

Thomas Helget

**Untersuchungen zum lasergeführten
Lichtbogenschweißen zur Steigerung der
Prozessstabilität und zur Lichtbogensteuerung**

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FB Maschinenbau / Feinwerktechnik

Dresden, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Axel Jahn

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:



Aufgabenstellung

Fraunhofer Gesellschaft

Lichtbogenschweißverfahren, wie das MSG-Schweißen, sind in der Schweißfertigung in der Industrie sehr weit verbreitet. Allerdings werden in einigen Anwendungsfällen die Verfahrensgrenzen in Bezug auf die erreichbare Schweißgeschwindigkeit und die Prozessstabilität erreicht. Zudem kann der Lichtbogen beim konventionellen MSG-Schweißen nur sehr eingeschränkt lokal gesteuert werden, was beispielsweise zum Ausgleich von Fehlpositionierungen, Spaltänderungen oder Schwankungen der Nahtvorbereitung notwendig sein kann.

Ziel der Arbeit ist es, Beeinflussungen des MSG-Prozesses durch einen Laserprozess zu untersuchen. Hierzu soll der Lichtbogen des MSG-Schweißprozesses durch einen integrierten Laserstrahl mit geringer Strahlleistung stabilisiert und geführt werden.

Betrachtet werden die zwei folgenden Werkstoffgruppen:

- verzinktes Stahlblech (Karosseriebau),
- Baustahl und ferritischer Chromstahl (Schienenfahrzeugbau).

Anhand der Analyse der Lichtbogen Physikalischen Grundlagen sind Ansatzpunkte für eine effektive Interaktion zwischen Lichtbogen und Laserstrahl zu erarbeiten. In den experimentellen Untersuchungen sind die relevanten Prozessparameter systematisch zu variieren und die entsprechenden Reaktionen im Schweißprozessverhalten über die Auswertung der Lichtbogenmessgrößen (I- und U-Verlauf) und durch Hochgeschwindigkeits-Kameraaufnahmen zu analysieren. Die Schweißnahtqualität ist visuell zu begutachten und anhand von Querschliffen zu bewerten.

In der Arbeit sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

1. Literaturstudium zum Laserhybridschweißen und lasergeführten Lichtbogenschweißen
2. Experimentelle Ermittlung der Verfahrensgrenzen beim MSG-Schweißen
3. Experimentelle Untersuchungen zum lasergestütztes MSG-Schweißen mit der Kombinationen CO₂- Laser (cw-Betrieb) + MSG
4. Verallgemeinerung und Dokumentation der Ergebnisse.

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. P. Hübner (FH Mittweida)
Dipl.-Ing. A. Jahn (FhG IWS Dresden)
Dipl.-Ing. S. Rose (TU Dresden)

Ausgehändigt am: 16.10.2008

Einzureichen am: 23.03.2009

Bibliographische Beschreibung:

Helget, Thomas:

Untersuchungen zum lasergeführten Lichtbogenschweißen zur Steigerung der Prozessstabilität und zur Lichtbogensteuerung. – 2008. – 64 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik, Diplomarbeit, 2009

Referat:

Ziel der Diplomarbeit ist es, den Einfluss des Laserstrahlprozesses auf den MAG Prozess zu untersuchen. Dabei wird der Lichtbogen durch einen, in Schweißrichtung, vor ihm positionierten CO₂-Laserstrahl niedriger Leistung unterstützt (<300 W). Der Laserstrahl stabilisiert den Lichtbogen, wodurch die Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zum konventionellen MAG-Schweißen erhöht werden kann. Somit ist ein sicheres Durchschweißen mit gleichmäßiger Schweißnahtqualität gewährleistet. Die Untersuchungen wurden an Werkstoffen, welche für den Automobil- und Schienenfahrzeugbau typisch sind, durchgeführt. Der Werkstoff für die Automobilindustrie ist höherfestes, verzinktes Stahlblech (HX340LAD Z100) mit einer Dicke von 1,5 mm, welches im Überlappstoß geschweißt wurde. Für den Schienenfahrzeugbau kam eine Mischverbindung im Überlappstoß aus 1,5 mm dickem hochlegiertem, nichtrostendem Stahl (X2CrNi12+2B) mit 8 mm dickem, höherfestem Baustahl (S355J2G4C+N) zum Einsatz. Durch die Laserunterstützung kann die Schweißgeschwindigkeit für den Überlappstoß beim HX340LAD Z100 im Kurzlichtbogen von 0,8 m/min auf 1,6 m/min gesteigert werden. Bei der Mischverbindung ist eine Steigerung im Sprühlichtbogen von 1,4 m/min auf 2,0 m/min möglich. Der Laserstrahl hat somit im Kurz- und Sprühlichtbogenbereich einen offensichtlichen Einfluss auf den Schweißprozess.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XII
Formelzeichen und Abkürzungen	XIII
Wortbezogene Abkürzungen	XIII
Formelzeichen	XIV
Legierungsbezeichnungen	XV
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	2
2.1. Metallschutzgasschweißen	2
2.1.1. Stromversorgung	2
2.1.2. Drahtvorschubeinheit	3
2.1.3. Lichtbogenarten	4
2.2. Laser	7
2.2.1. Grundlagen der Laserstrahlung	7
2.2.2. Charakteristik des Laserstrahls	11
2.2.3. CO ₂ -Laser	12
2.3. Hybridschweißverfahren	14
2.3.1. Grundlagen des Laserstrahl-MSG-Hybridschweißens	14
2.3.2. Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Lichtbogenplasma	17
2.3.3. Industrielle Anwendung	18
2.3.4. Lasergeführtes MSG-Schweißen	19
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	22
4. Versuchsanlagen und Werkstoffe	25
4.1. Verwendete Anlagen	25
4.1.1. MSG-Stromquelle	25
4.1.2. CO ₂ -Laser	26
4.1.3. Hybridkopf	27
4.1.4. Laserportalanlage	28
4.1.5. Prozessbeobachtung	29
4.2. Werkstoffe	30
4.2.1. Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B	30
4.2.2. Höherfester Baustahl S355J2G4C+N	30

4.2.3.	Höherfester verzinkter Stahl HX340LAD Z100.....	31
4.2.4.	Zusatzwerkstoff	31
4.3.	Theoretische Vorbetrachtung zum Schweißnahtgefüge.....	32
4.3.1.	Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B mit Baustahl S355J2G4C+N	32
4.3.2.	Verzinktes Stahlblech HX340LAD Z100	33
5.	Versuchsdurchführung	34
6.	Prozessuntersuchung zum lasergeführten MAG-Schweißen.....	38
6.1.	Einfluss des Laserstrahls auf die Schweißgeschwindigkeit.....	38
6.1.1.	Verzinktes Stahlblech HX340LAD Z100	38
6.1.2.	Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B mit Baustahl S355J2G4C+N	44
6.2.	Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität.....	48
6.3.	Einfluss des Laserstrahls auf Lichtbogenlenkung und –verhalten	54
7.	Diskussion der Versuchsergebnisse	58
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	63
Anlage 1:	Strahlkaustik DC035	65
	Literaturverzeichnis	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema einer Drahtfördereinrichtung [2]	3
Abbildung 2: Lichtbogenarten in Abhängigkeit von Stromstärke und Drahtvorschub [3]	4
Abbildung 3: Momentaufnahme verschiedener Lichtbogenarten [4]	5
Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Laserstrahlquelle [6]	8
Abbildung 5: Darstellung der stimulierten Emission [7]	9
Abbildung 6: Darstellung verschiedener TEM-Moden [8]	9
Abbildung 7: Prinzip des Wärmeleitungsschweißens a) und des Tiefschweißens b) [6]	10
Abbildung 8: Modellvorstellung physikalischer Vorgänge der anomalen Absorption des Laserstrahls [9]	11
Abbildung 9: Ausbreitung eines Gaußstrahls ($M^2=1$, rot dargestellt) im Vergleich zu einem Strahlungsfeld mit geringerer Strahlqualität ($M^2>1$, grün dargestellt) bei gleichem Durchmesser d_0 der Strahltaile [10]	12
Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau längs- und quergeströmter CO ₂ -Laser [11]	13
Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau eines CO ₂ -Slab-Lasers [12]	14
Abbildung 12: Verfahrensvarianten der Kombination von Lichtbogen und Laserstrahl [13]	15
Abbildung 13: Typische Schweißnähte für die jeweiligen Prozesse; links: Laserstrahlschweißen; Mitte: MSG-Schweißen; rechts: Hybridschweißen [15]	16
Abbildung 14: Linearer Absorptionsgrad für CO ₂ - und Nd:YAG-Laser in Abhängigkeit der Lichtbogentemperatur bei bestimmten Elektronendichten im Lichtbogen unter Argonatmosphäre [23]	17
Abbildung 15: Schema der Vorgehensweise	24
Abbildung 16: Merkle PU520 DW	25
Abbildung 17: Elmatech Variomig 250 AC/DC	25
Abbildung 18: verwendeter 3,5 kW CO ₂ -Laser (Rofin Sinar DC035)	26
Abbildung 19: MSG-Laser-Hybridkopf (linkes Bild) und Brennerjustierschlitten (rechtes Bild)	28
Abbildung 20: Aussparung an Gasdüse	28
Abbildung 21: Laserportalanlage	29
Abbildung 22: zu erwartendes Schweißnahtgefüge der Verbindung von S355J2G4C+N (Werkstoff 1) mit X2CrNi12+2B (Werkstoff 2) mit dem Schweißgut G18-8Mn (1.4370) laut Schaeffler [41]	33
Abbildung 23: Ansicht des Versuchsaufbaus quer zur Schweißrichtung	34
Abbildung 24: Ansicht des Versuchsaufbaus in Schweißrichtung	34

Abbildung 25: Darstellung der Fügestelle; links: Ansicht in Schweißrichtung ; rechts: Seitenansicht	34
Abbildung 26: Vergleich der tatsächlichen (P_L eingestellt) mit der eingestellten (P_L gemessen) Laserleistung	35
Abbildung 27: Versuchsaufbau mit High-Speed-Kamera.....	36
Abbildung 28: Parameterübersicht für die Auftragsschweißung für HX340LAD Z100 und für S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B	37
Abbildung 29: Parameterübersicht für den Überlappstoß für HX340LAD Z100 und für S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B	37
Abbildung 30: Auftragsnaht (#18) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,09$ kJ/mm.....	39
Abbildung 31: Auftragsnaht (#20) mit: $v_S = 2,0$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V.....	39
Abbildung 32: Überlappverbindung (#102) mit: $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,20$ kJ/mm.....	40
Abbildung 33: Überlappverbindung (#105) mit: $v_S = 1,3$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V.....	40
Abbildung 34: Querschliff einer Überlappverbindung (#102) mit: $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,20$ kJ/mm.....	40
Abbildung 35: Auftragsnaht (#56) mit: $v_S = 2,1$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 66$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,08$ kJ/mm.....	41
Abbildung 36: Auftragsnaht (#78) mit: $v_S = 2,2$ m/min, $a = 1$ mm, $P_L = 190$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,08$ kJ/mm	41
Abbildung 37: Überlappverbindung (#119) mit: $v_S = 1,6$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,11$ kJ/mm	42
Abbildung 38: Überlappverbindung (#120) mit: $v_S = 1,7$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V.....	42
Abbildung 39: Querschliff einer Überlappverbindung (#119) mit: $v_S = 1,6$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, $E = 0,11$ kJ/mm	42
Abbildung 40: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung für den Werkstoff HX340LAD Z100 (Überlappstoß). Parameter: $I = 135$ A; $U = 20,0$ V; $a = 0,2$ mm; $d_{\text{Spot}} = 300$ μm ; $s = 0,2$ mm.....	43
Abbildung 41: Überlappverbindung (#21) mit: $v_S = 1,4$ m/min, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V, $E = 0,31$ kJ/mm.....	44
Abbildung 42: Überlappverbindung (#26) mit: $v_S = 1,7$ m/min, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V...	44
Abbildung 43: Querschliff einer Überlappverbindung (#23) mit: $v_S = 1,4$ m/min, $I = 258$ A, $U = 25,0$ V, $E = 0,31$ kJ/mm.....	45
Abbildung 44: Überlappverbindung (#47) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 24,1$ V, $E = 0,22$ kJ/mm.....	46

Abbildung 45: Überlappverbindung (#31) mit: $v_S = 1,9$ m/min, $a = 2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V.....	46
Abbildung 46: Querschliff einer Überlappverbindung (#47) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 24,1$ V, $E = 0,22$ kJ/mm	46
Abbildung 47: Überlappverbindung (#38) mit: $v_S = 2,0$ m/min, $a = 2$ mm, $d_{Spot} = 440$ μ m, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V, $E = 0,23$ kJ/mm	47
Abbildung 48: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes a für die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N (Überlappstoß). Parameter: $I = 258$ A; $U = 28,2$ V; $P_L = 315$ W; $d_{Spot} = 300$ μ m.....	49
Abbildung 49: Seitenansicht einer Überlappverbindung (#29) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V	49
Abbildung 50: Überlappverbindung (#36) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 0,2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 28,2$ V.....	49
Abbildung 51: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes a für den Werkstoff HX340LAD Z100 (Überlappstoß). Parameter: $I = 135$ A; $U = 20,0$ V; $P_L = 253$ W; $d_{Spot} = 300$ μ m; $s = 0,2$ mm.	50
Abbildung 52: Überlappverbindung (#130) mit: $v_S = 1,6$ m/min, $a = 3$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V.....	50
Abbildung 53: Überlappverbindung (#131) mit: $v_S = 1,6$ m/min, $a = 4$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V.....	50
Abbildung 54: Überlappverbindung (#44) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 30,2$ V.....	51
Abbildung 55: Überlappverbindung (#45) mit: $v_S = 1,8$ m/min, $a = 2$ mm, $P_L = 315$ W, $I = 258$ A, $U = 32,3$ V.....	51
Abbildung 56: Seiten- und Draufsicht einer Überlappverbindung (#401) mit: Werkstück = HX340LAD Z100, $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, Stromkontaktrohrabstand = $12,5$ mm	51
Abbildung 57: Seiten- und Draufsicht einer Überlappverbindung (#405) mit: Werkstück = HX340LAD Z100, $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, Stromkontaktrohrabstand = 15 mm	51
Abbildung 58: Überlappverbindung (#403) mit: Werkstück = HX340LAD Z100, $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, Stromkontaktrohrabstand = 19 mm	51
Abbildung 59: Darstellung der Kollision zwischen Brenner und Laserstrahl bei zu kleinem Abstand a	52
Abbildung 60: Auftragsnaht mit: $v_S = 0,8$ m/min, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V, Schutzgasdüse mit großer Aussparung.....	52

Abbildung 61: Auftragsnaht mit: $v_s = 0,8 \text{ m/min}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$, Schutzgasdüse mit kleiner Aussparung.....	52
Abbildung 62: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Spotdurchmessers für die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N (Überlappstoß). Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $P_L = 315 \text{ W}$; $a = 2 \text{ mm}$; $d_{\text{spot}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$	53
Abbildung 63: Auftragsnaht mit: Werkstück = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $b = 1 \text{ mm}$, $P_L = 800 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	54
Abbildung 64: Auftragsnaht mit: Werkstück = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $b = 1 \text{ mm}$, $P_L = 600 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	54
Abbildung 65: Auftragsnaht mit: Werkstück = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $b = 2 \text{ mm}$, $P_L = 1000 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	54
Abbildung 66: Auftragsnaht mit: Werkstück = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $b = 2 \text{ mm}$, $P_L = 800 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	54
Abbildung 67: Lichtbogenverhalten beim konventionellen MSG-Schweißen. Werkstoff = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	55
Abbildung 68: Lichtbogenverhalten beim laserunterstützten MSG-Schweißen. Werkstoff = S355J2G4C+N, $v_s = 2,1 \text{ m/min}$, $b = 2 \text{ mm}$, $P_L = 1000 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	56
Abbildung 69: Stromverlauf des konventionellen MAG-Prozesses. Eingestellte Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $v_s = 1,7 \text{ m/min}$	57
Abbildung 70: Stromverlauf des laserunterstützten MAG-Prozesses mit 315 W Laserleistung. Eingestellte Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $P_L = 315 \text{ W}$; $v_s = 1,7 \text{ m/min}$	57
Abbildung 71: Vergleich der Schweißgeschwindigkeiten zwischen konventionellen Schweißen und lasergeführten Schweißen der Mischverbindung X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N im Überlappstoß.....	58
Abbildung 72: Vergleich der Schweißgeschwindigkeiten zwischen konventionellen Schweißen und lasergeführten Schweißen von HX340LAD Z100 im Überlappstoß.....	59
Abbildung 73: Vergleich der Streckenenergie zwischen konventionellem und laserunterstützten Schweißen am Überlappstoß des Werkstoffes HX340LAD Z100 und der Werkstoffkombination S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B.	60
Abbildung 74: Überlappverbindung (#37) mit: $v_s = 1,9 \text{ m/min}$, $a = 2 \text{ mm}$,	61
Abbildung 75: Überlappverbindung (#29) mit: $v_s = 1,8 \text{ m/min}$, $a = 2 \text{ mm}$, $P_L = 253 \text{ W}$, $I = 258 \text{ A}$, $U = 28,2 \text{ V}$	61

Abbildung 76: Wurzel- und Decklagenansicht einer Auftragsnaht mit: $v_s = 1,8 \text{ m/min}$, $a = 2 \text{ mm}$, $P_L = 600 \text{ W}$, $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$	61
Abbildung 77: Wurzel- und Decklagenansicht einer Auftragsnaht mit: $v_s = 1,8 \text{ m/min}$, $I = 160 \text{ A}$, $U = 22,1 \text{ V}$	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ausgewählte Parameter für CO ₂ - und Nd:YAG-Laser nach [27], [29], [30], [9], [33], [38].....	21
Tabelle 2: Nd:YAG-Lasereinfluß auf Einschweißtiefe bei Aluminium ($P_L = 300 \text{ W}$) [28]	21
Tabelle 3: Nd:YAG-Lasereinfluß auf Einschweißtiefe bei Hartmetall ($z_f = +4 \text{ mm}$) [29]	21
Tabelle 4: Technische Daten des verwendeten 3,5kW CO ₂ -Lasers (Rofin Sinar DC035)	26
Tabelle 5: Variationsmöglichkeiten des verwendeten Hybridkopfes.....	28
Tabelle 6: chem. Analyse des GW X2CrNi12+2B (Angaben in %)	30
Tabelle 7: chem. Analyse des GW S355J2G4C+N (Angaben in %)	31
Tabelle 8: chem. Analyse des GW HX340LAD Z100 (Angaben in %).....	31
Tabelle 9: chem. Zusammensetzung des ZW G3Si1 nach DIN EN 440 (Angaben in %)	32
Tabelle 10: chem. Zusammensetzung des ZW G18-8Mn nach DIN EN ISO 14343-A (Angaben in %)	32
Tabelle 11: Parameter für die Auftragsschweißung von HX340LAD Z100.....	38
Tabelle 12: Parameter für die Überlappverbindung von HX340LAD Z100	39
Tabelle 13: Parameter für die laserunterstützte Auftragsschweißung von HX340LAD Z100.....	41
Tabelle 14: Parameter für die laserunterstützte Überlappverbindung von HX340LAD Z100.....	41
Tabelle 15: Parameter für die Überlappverbindung von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N.....	44
Tabelle 16: Parameter für die laserunterstützte Überlappverbindung von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N	45

Formelzeichen und Abkürzungen

Wortbezogene Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
AC	-	alternating current
cw	-	Anregungsart „continuous wave“
DC	-	direct current
GW	-	Grundwerkstoff
HL	-	Hochleistungslichtbogen
HL-KLB	-	Hochleistungslichtbogen – Kurzlichtbogen
HL-RLB	-	Hochleistungslichtbogen – rotierender Lichtbogen
HL-SLB	-	Hochleistungslichtbogen – Sprühlichtbogen
Hybrid	-	Laserstrahl-MSG-Hybrid
ILB	-	Impulslichtbogen
IWS	-	Institut für Werkstoff- und Strahltechnik
KLB	-	Kurzlichtbogen
LLB	-	Langlichtbogen
MAG	-	Metall-Aktivgas
MIG	-	Metall-Inertgas
MSG	-	Metall-Schutzgas
Nd:YAG	-	Yttrium-Aluminium-Granat mit Neodym-Ionen ³⁺ dotiert
RLB	-	Rotierender Lichtbogen
SLB	-	Sprühlichtbogen
TEM	-	transversaler elektromagnetischer Mode
ÜLB	-	Übergangslichtbogen
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
WIG	-	Wolfram-Inertgas
ZW	-	Zusatzwerkstoff

Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
z_R	mm	Rayleighlänge
Θ	mrad	Strahldivergenzwinkel
α	°	Winkel zwischen Laserstrahl + Brenner und Werkstückoberfläche (orthogonal zur Schweißrichtung)
λ	μm	Wellenlänge
a	mm	Abstand von Lichtbogenfußpunkt und Laserfußpunkt in Schweißrichtung
b	mm	Abstand von Lichtbogenfußpunkt und Laserfußpunkt quer zur Schweißrichtung
d_0	mm	Strahltaillendurchmesser
d_D	mm	Drahtdurchmesser
d_{Fokus}	μm	Laserfokusedurchmesser
d_{Spot}	μm	Laserspotdurchmesser
E	kJ/mm	Streckenenergie
E_L	kW/cm ²	Leistungsflussdichte
f	mm	Brennweite
Gas	l/min	Schutzgasdurchflussmenge für MSG-Prozess
h	mm	Höhe der Einbrandkerbe
I	A	Stromstärke
K	-	Strahlqualität
k	-	thermischer Wirkungsgrad
M^2	-	Beugungsmaßzahl
P_{Ges}	W	Gesamtleistung
P_L	W	Laserleistung
s	mm	Spalt zwischen Oberblech und Unterblech
t	mm	Blechdicke
U	V	Spannung
v_D	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
v_S	m/min	Schweißgeschwindigkeit
z	mm	Entfernung
z_F	mm	Fokuslage relativ zur Werkstückoberfläche
β	°	Winkel zwischen Brenner und der Werkstückoberfläche (in Schweißrichtung)

Legierungsbezeichnungen

Werkstoff- nummer	Werkstoffname	Norm
1.0579	S355J2G4C	DIN EN 10025-2 (04/2005)
1.0933	HX340LAD (H340LAD †)	DIN EN 10292 (03/2005)
1.4003	X2CrNi12 (X2Cr11 †)	DIN EN 10088-2 (09/2005)
	G18-8Mn	DIN EN ISO 14343-A
	G3Si1	DIN EN 440

1. Einleitung

Das Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) ist durch seine günstigen Anschaffungs- und Betriebskosten, der hohen Abschmelzleistung und der Unempfindlichkeit gegenüber geometrischen Toleranzen (Spaltüberbrückbarkeit), sowie der einfachen Handhabung ein hervorragendes Verfahren, um im Bauwesen, Schiffbau und auch in der Industrie wie Automobil- und Schienenfahrzeugbau eingesetzt zu werden.

Der starke internationale Konkurrenzkampf und die zunehmend steigenden Lohnkosten fordern von den Firmen eine stärkere Optimierung ihrer Fertigungslinien. Dabei spielen die Anpassung des Schweißprozesses, sowie die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit eine erhebliche Rolle, da sie direkt mit den Lohnkosten zusammenhängen.

Hier treten die Nachteile des MSG-Prozesses zu Tage. Die im Vergleich zum Laserstrahlschweißen geringen Schweißgeschwindigkeiten bringen viel Wärme, hohe Streckenenergie, in das Bauteil ein und erzeugen damit starken Verzug und Gefügeumwandlungen, welche oftmals notwendige Nachbehandlungsschritte erfordern. Bei ungünstigen Nahtgeometrien kann aufgrund der Blaswirkung der Lichtbogen einseitig abgelenkt werden. Dadurch können Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen entstehen. Aufgrund begrenzter Steuerungsmöglichkeiten kann auf Geometrieänderungen des Schweißstoßes nur eingeschränkt reagiert werden. Durch Gegenmaßnahmen können diese Nachteile reduziert werden, verursachen aber einen erhöhten Prozessaufwand.

Der Vorteil der Lasertechnik liegt in der hohen Schweißgeschwindigkeit, dem tiefen Einbrand und der geringen Wärmeeinbringung. Aufgrund der stark fokussierten Laserstrahlung sind jedoch geringe Spaltmaße und eine hohe Positioniergenauigkeit gefordert. Aufgrund der hohen Anschaffungs- und Betriebskosten der Laseranlagen lohnen sich diese nur bei hohen Stückzahlen.

Im Dünnblechbereich, wie er im Automobil- und Schienenfahrzeugbau vorwiegend anzutreffen ist, kann hierbei durch die Kopplung der Laser- und MSG-Schweißprozesse die Fertigung noch weiter optimiert werden. Hier soll jedoch unter der Kopplung dieser beiden Prozesse nicht das klassische Laserstrahl-MSG-Hybridverfahren verstanden werden. Ein Laserstrahl geringer Leistung und hoher Intensität soll der Führung und Stabilisierung des MSG-Prozesses dienen um die interne Prozesssteuerung des dieses Prozesses zu verbessern. Durch Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Streckenenergie soll die Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

2. Stand der Technik

2.1. Metallschutzgasschweißen

Das Metallschutzgasschweißen ist ein Lichtbogenschweißverfahren mit endlos abschmelzender Drahtelektrode. Das Schmelzbad wird durch einen Schutzgasmantel vor der Oxidation durch die umgebende Atmosphäre geschützt. Durch die Kombination verschiedener Schutzgase und Drahtelektroden sind nahezu alle schweißgeeigneten Werkstoffe in jeder Position schweißbar. Der zu fügende Blechdickenbereich beginnt bei ca. 0,8 mm. Mit neueren MSG-Verfahren, wie z.B. dem CMT-Verfahren von Fronius, lassen sich auch Blechdicken ab 0,3 mm fügen [1]. Durch die hohe erzielbare Abschmelzleistung sind auch dicke Bleche hervorragend zu schweißen. Unlegierte und legierte Stähle, sowie Chrom-Nickel-Stähle werden unter Mischgas mit Aktivgasanteilen (CO_2 , O_2) geschweißt. Mit Inertgasanteilen (Argon, Helium) im Mischgas werden Aluminium, Magnesium, Kupfer, Titan und weitere geschweißt. Chrom-Nickel-Stähle lassen sich auch mit Inertgasanteilen schweißen, wodurch das Entstehen von Verzunderungen und Anlauffarben verhindert wird. Anhand der verwendeten Schutzgase unterscheidet man in Metallaktivgas- (MAG) und Metallinertgasschweißen (MIG). Der schematische Aufbau einer MSG-Schweißanlage besteht aus Schweißstromquelle, Drahtvorschubeinheit, Schlauchpaket mit Schweißbrenner und Schutzgasversorgung.

MSG-Schweißen ist aufgrund seiner Vielzahl von Vorteilen aus der Industrie, dem Stahl-, Schiff-, Behälter- und Fahrzeugbau nicht mehr weg zu denken. Die hervorragende Spaltüberbrückbarkeit, der stabile Prozess und die geringen Anforderungen an dieses Verfahren eignen sich bestens für die Mechanisierung mit dem Roboter.

2.1.1. Stromversorgung

Die Stromquellencharakteristik beim MSG-Schweißen ist eine Konstantspannungscharakteristik oder eine leicht fallende Kennlinie (2-7 V pro 100 A). Dabei ist die Elektrode in der Regel am Pluspol angeschlossen. Bei Minuspolung entstehen verstärkt Spritzer. Die Stromregelung erfolgt durch die Δi -Regelung (innere Regelung). Allgemeine Anforderungen an die Schweißstromquelle sind eine niedrige Lichtbogen Spannung (15 – 100 V), hoher Schweißstrom (15 – 500 A), geringe Schweißstromschwankungen, ein kurzschlussicherer Stromkreis und der einstellbare Schweißstrom.

Hierfür gibt es verschiedene Stromquellen:

- Schweißumformer
- Schweißtransformator
- Schweißgleichrichter (mit Transduktor, Thyristorsteuerung oder Inverter)
- elektronische Stromquellen (Analogstromquellen oder getaktete Stromquellen)
- Impulsstromquellen

Dabei besitzt der Inverter mit über 90 % den höchsten Wirkungsgrad, bei kompakter und leichter Bauweise. Der Schweißumformer hat mit 50 – 60 % den niedrigsten Wirkungsgrad [2].

2.1.2. Drahtvorschubeinheit

Die Drahtvorschubeinheit fördert den auf einer Spule aufgetragenen Zusatzwerkstoff (ZW) durch das Schlauchpaket zum Brenner. Um ein gleichmäßiges Schweißverhalten zu gewährleisten, muss die Drahtförderung kontinuierlich erfolgen. Bei einem zu langsamen Drahtvorschub brennt der Draht ab, wodurch der Lichtbogen bis zur Stromkontaktdüse zurückbrennt und diese dabei schmilzt. Läuft der Drahtvorschub ungleichmäßig, so werden Kurzschlüsse erzeugt, welche zu verstärkter Spritzerbildung führen. Der Drahtvorschub erfolgt über Transportrollen. Dabei können eine oder mehrere Rollen angetrieben sein. Um einen sicheren Drahttransport zu gewährleisten, sind in die Rollen entweder Nute oder für weiche Drähte, dem Drahtdurchmesser angepasste Radien eingebracht. Ein Schema der Drahtförderung ist in Abbildung 1 dargestellt. Um Drall und Unwucht des Drahtes zu minimieren, wird der Draht, nachdem er abgewickelt wurde, durch drei Rollen gerichtet. Bei längeren Schlauchpaketen und mechanisierten Anwendungen sollten sich im Brenner oder kurz davor zusätzliche Drahtförderrollen befinden, um ein Ausknicken oder Stocken des Drahtes zu verhindern (Push-Pull-Brenner).

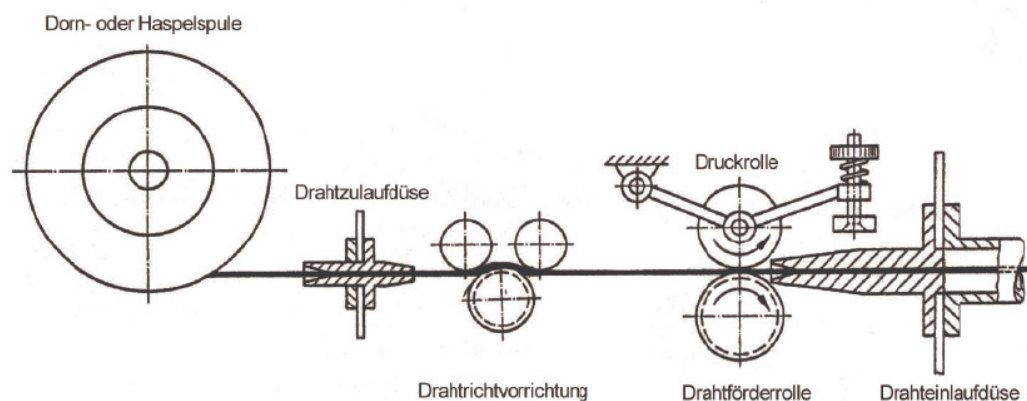


Abbildung 1: Schema einer Drahtfördereinrichtung [2]

2.1.3. Lichtbogenarten

Unterschiedliche Stromstärken und Drahtvorschubgeschwindigkeiten unterteilen den Lichtbogen in verschiedene Arten, welche unterschiedliche Abschmelzleistungen aufweisen. Die Abhängigkeit der Lichtbogenart von der Stromstärke bzw. der Drahtvorschubgeschwindigkeit ist in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich beeinflusst auch das gewählte Schutzgas und der Drahtdurchmesser die Entstehung der Lichtbogenart. Die Werte aus Abbildung 2 sind somit als Richtwerte zu verstehen und variieren von Fall zu Fall. In Abbildung 3a-f sind Momentaufnahmen der unterschiedlichen Lichtbogenarten dargestellt. Anhand der Darstellung in Abbildung 2 ergeben sich folgende Lichtbogenarten.

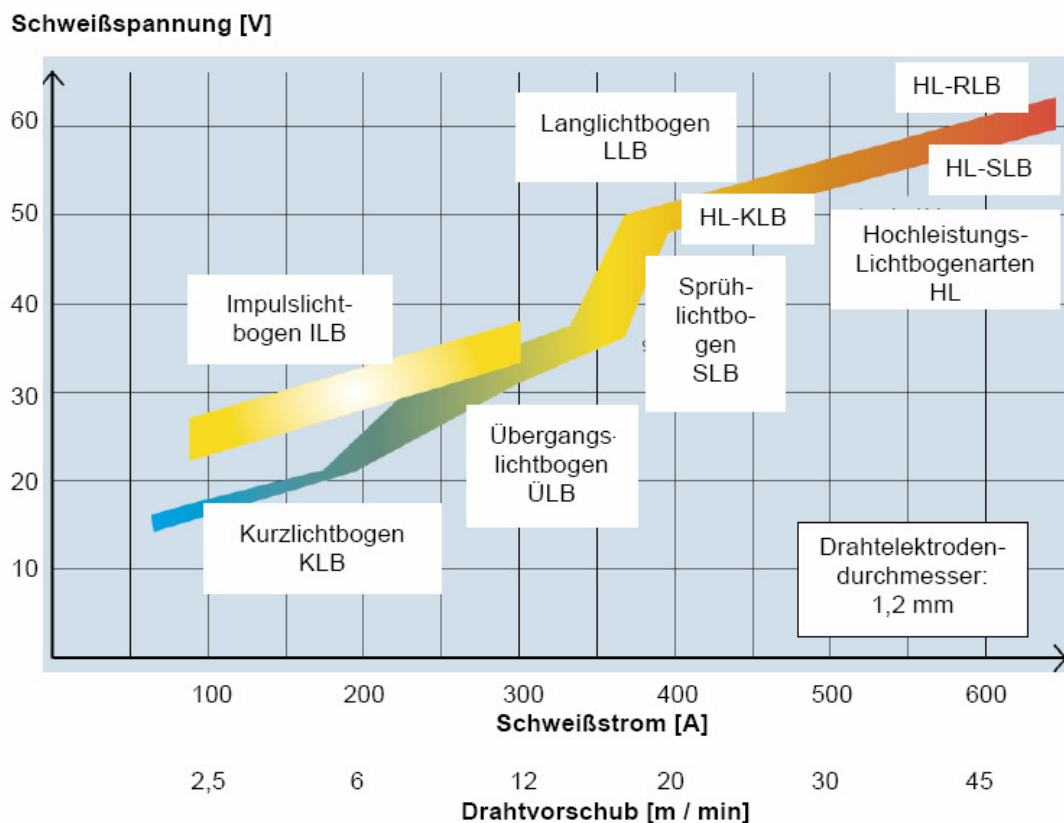


Abbildung 2: Lichtbogenarten in Abhängigkeit von Stromstärke und Drahtvorschub [3]

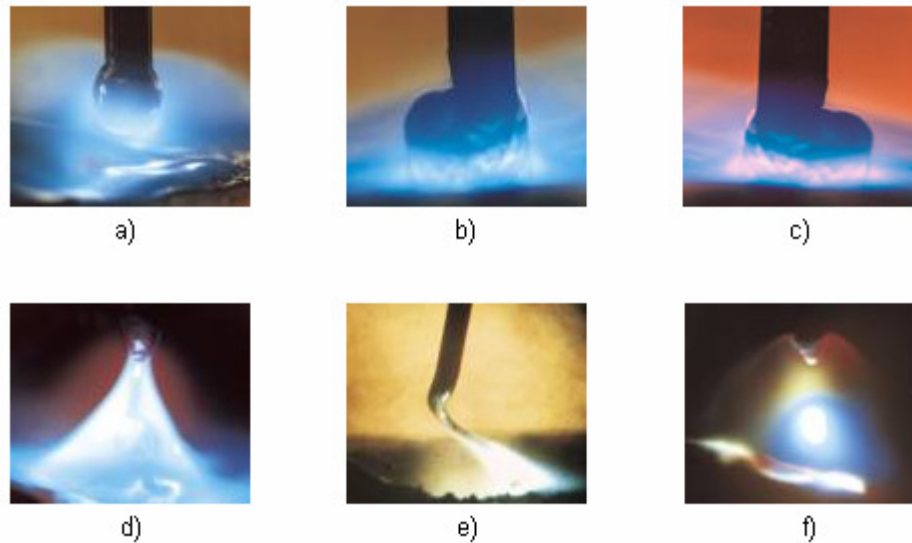


Abbildung 3: Momentaufnahme verschiedener Lichtbogenarten [4]

Kurzlichtbogen (KLB)

Beim Kurzlichtbogen (Abb. 3a) findet der Werkstoffübergang mit geringer Spritzerbildung im Kurzschluss im unteren Leistungsbereich bis etwa 180 A statt. Der Werkstoffübergang ist grobtropfig mit Kurzschlussbrücke. Durch die geringe Abschmelzleistung und Wärmeeinbringung lässt sich das Schmelzbad gut beherrschen, womit sich seine Anwendung im Dünnblechbereich, bei der Wurzelschweißung, sowie in Zwangslagen begründen lässt.

Übergangslichtbogen (ÜLB)

Der Übergangslichtbogen (Abb. 3b) ist durch seinen unregelmäßigen kurzschlussbehafteten, fein- bis grobtropfigen Werkstoffübergang charakterisiert. Er kann im mittleren Blechdickenbereich und in Zwangslagen bei 180-330 A eingesetzt werden. Aufgrund seines unregelmäßigen Verhaltens und der verstärkten Spritzerbildung wird er aber vermieden.

Langlichtbogen (LLB)

Der Langlichtbogen (Abb. 3c) entsteht unter hohem CO₂-haltigem Schutzgas und kann im mittleren bis dicken Blechdickenbereich in den Positionen PA und PB angewendet werden. Der kurzschlussbehaftete Werkstoffübergang ist grobtropfig. Die durch das CO₂-haltige Schutzgas stark eingeschnürte Lichtbogenansatzstelle am Drahtende bewirkt ein seitliches Herausdrücken des Tropfens, wodurch das starke Spritzeraufkommen entsteht [5].

Sprühlichtbogen (SLB)

Unter argonreichem Schutzgas entsteht im Leistungsbereich von 330-400 A der Sprühlichtbogen (Abb. 3d). Aufgrund seiner hohen Abschmelzleistung wird er in den Positionen PA und PB im mittleren und dicken Blechdickenbereich eingesetzt. Der durch das Argon nicht so stark eingeschnürte Lichtbogenansatz am freien Drahtende führt zu einer konisch geformten Elektrodenspitze, die einen feintropfigen, kurzschlussfreien und nahezu spritzerfreien Werkstoffübergang ermöglicht [5].

Hochleistungslichtbogen (HL)

Im obersten Leistungsbereich, ab ca. 400 A, stellt sich der Hochleistungslichtbogen ein. Die Lichtbogenart und der Werkstoffübergang sind abhängig von der Zusammensetzung des Schutzgases, welches aus argonreichen Schutzgasen mit Heliumanteilen besteht. Er kann im Hochleistungs-Kurzlichtbogen (HL-KLB), Hochleistungs-Sprühlichtbogen (HL-SLB) oder einem hochleistungsrotierenden Lichtbogen (HL-RLB, Abb. 3e) auftreten. Das stromführende, freie Drahtende beträgt bei dem RLB 25-35 mm. Dabei beginnt es zu rotieren, wodurch der Werkstoffübergang feintropfig und radial in das Schmelzbad geschleudert wird [2], [5].

Impulslichtbogen (ILB)

Dieser Lichtbogen (Abb. 3f) kann im Leistungsbereich von 80-300 A eingesetzt werden. Dabei wird ein Grundstrom von einem höheren Impulsstrom überlagert. Pro Impuls wird ein Tropfen kurzschlussfrei durch den Pincheffekt abgelöst. Schweißen unter CO₂-haltigem Schutzgas ist nicht möglich, da sonst eine stark eingeschnürte Lichtbogenansatzstelle den feintropfigen Werkstoffübergang verhindert. Es tritt die geringste Spritzerbildung aller Lichtbogenarten auf.

Der MSG-Prozess weist aufgrund seiner guten Spaltüberbrückbarkeit und hohen Abschmelzleistung gewisse Vorteile auf. Aufgrund der geringen Schweißgeschwindigkeit wird eine große Streckenenergie eingebracht. Bei unterschiedlichen Blechdicken kann der Lichtbogen durch Blaswirkung von dem Prozessbearbeitungspunkt abgelenkt werden und Nahtflanken nur einseitig anschmelzen. Diese Nachteile und die begrenzte Steuermöglichkeit, mit der man auf Nahtimperfectionen reagieren kann, reduzieren die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens.

2.2. Laser

Der Begriff Laser leitet sich aus dem physikalischen Effekt des Verfahrens ab. Laser steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Verstärkung von Licht durch erzwungene Aussendung von Strahlung). Laserstrahlung ist eine monochromatische, kohärente Strahlung mit einer sehr geringen Divergenz. Es ist eine rein optische Energiequelle mit ausgezeichneter Richtungswirkung, welche sich über optische Spiegel oder Linsen, auf einen Arbeitspunkt mit einer sehr hohen Leistungsdichte (größer $1 \cdot 10^6 \text{ Watt/cm}^2$) fokussieren lässt. Die Wellenlänge und Intensität ist abhängig vom Lasertyp und geht vom Ultraviolett- bis zum Infrarotbereich. Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen, welche durch verschiedene laseraktive Medien erzeugt werden, unterteilt man in diverse Lasertypen. Es wird zwischen Gaslaser, Festkörperlaser, Flüssigkeitslaser, sowie Halbleiter- bzw. Diodenlaser unterschieden. Welche Laser zum Einsatz kommen, ist abhängig von deren Wellenlänge und Intensität. In der Materialbearbeitung werden Laser beispielsweise zum Schweißen (Festkörper-, CO_2 -Laser), Schneiden (CO_2 -Laser), Bohren (Festkörperlaser) oder Gravieren (Festkörperlaser niedriger Intensität) verwendet. Der Einfluss des Laserstrahls auf das Werkstück ist wellenlängenabhängig. So interagiert ein Festkörperlaser der Wellenlänge $1,064 \mu\text{m}$ kaum mit Plasma. Ein CO_2 -Laser der Wellenlänge $10,6 \mu\text{m}$ hingegen wird deutlich stärker von diesem absorbiert. Aufgrund der Wellenlänge der Festkörperlaser lässt sich diese Laserstrahlung in Glasfasern einkoppeln. CO_2 -Laserstrahlung hingegen muss über Umlenkspiegel zum Werkstück geführt werden.

2.2.1. Grundlagen der Laserstrahlung

Die Voraussetzung für die Erzeugung des Strahls ist das Vorhandensein eines laseraktiven Mediums, welches angeregt werden kann. Das Energieniveau des angeregten Zustandes wird mittels Pumpen erreicht. Der prinzipielle Aufbau jeder Laseranlage ist in Abbildung 4 dargestellt.

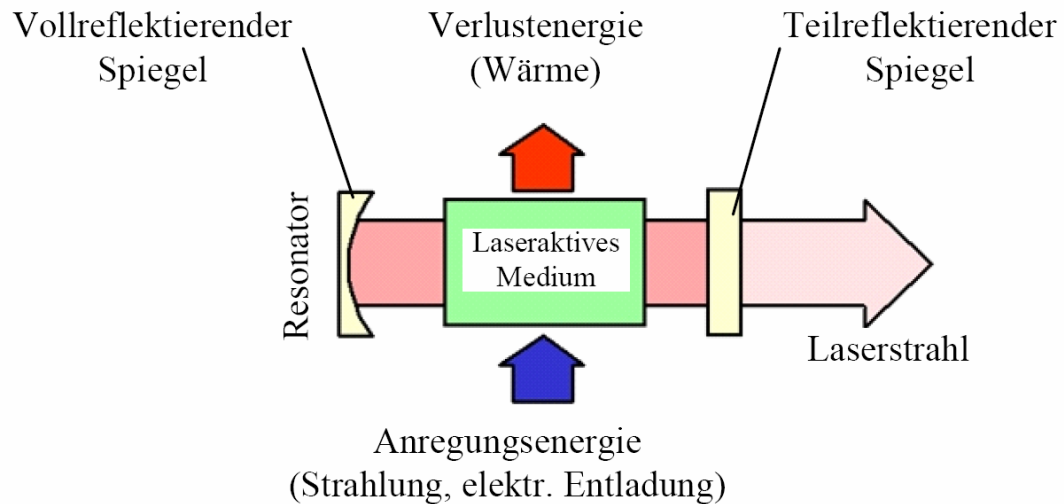


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Laserstrahlquelle [6]

Der Pumpvorgang kann optisch, elektrisch oder chemisch stattfinden. Wie die Energie zugeführt wird, hängt von dem laseraktiven Medium ab. Festkörperlaser werden beispielsweise optisch über Blitzlampen angeregt.

Durch den Pumpvorgang werden die Atome des aktiven Mediums von dem Energiegrundzustand E_0 auf einen höheren Energiezustand E_P versetzt (siehe Abbildung 5). Von diesem fallen sie spontan in einen metastabilen Zustand E_M . Wird nun ein Photon mit genau der Energiedifferenz der beiden Niveaus E_M und E_L induziert, verlässt das Atom den Metastabilen Zustand und gibt die Energie in Form eines Photons ab. Das abgegebene Photon hat genau dieselbe Frequenz und Phasenlage wie das Induzierte. Durch ständiges Pumpen existiert der Zustand höherer Energie häufiger als der Zustand niedriger Energie. Dies wird Besetzungsinversion genannt. Die abgegebenen Photonen wiederum lösen weitere Photonen aus, denen sich im metastabilen Zustand befindlichen Atomen, heraus. Somit wird ein sich selbst verstärkender Strahl erzeugt.

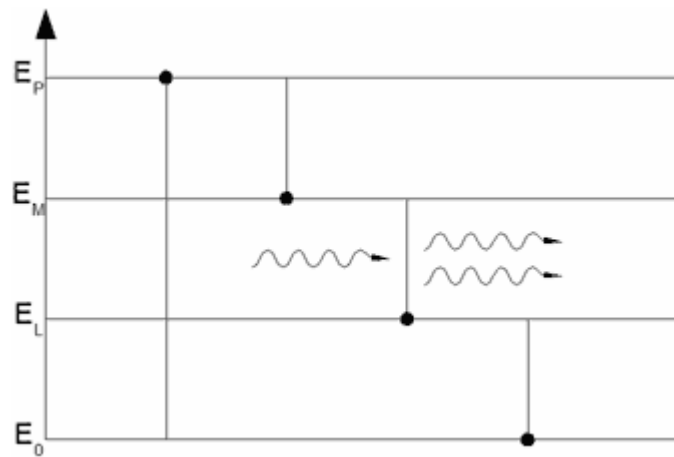


Abbildung 5: Darstellung der stimulierten Emission [7]

Im Resonator wird das Laserlicht immer wieder durch das aktive Medium hindurch geführt. Dabei tritt eine Verstärkung des Laserstrahls auf. Im einfachsten Fall besteht der Resonator aus 2 parallel angeordneten Spiegeln. Davon ist einer teildurchlässig um einen Teil des Laserstrahls aus dem Resonator auszukoppeln und ihn über Umlenkspiegel zum Werkstück zu führen. Durch Beugung an den Spiegeln im Resonator wird die transversale Intensitätsverteilung des Laserstrahls bestimmt. Dabei kann sie definierte Formen annehmen. Diese werden als transversale elektromagnetische Moden (TEM_{mn}) bezeichnet. Der Index m gibt die Anzahl der Knoten in X-Richtung und der Index n in Y-Richtung an. Der Grundmode hat die Form einer zweidimensionalen Gaußverteilung und wird als TEM_{00} -Mode bezeichnet. Abbildung 6 zeigt weitere TEM-Moden.

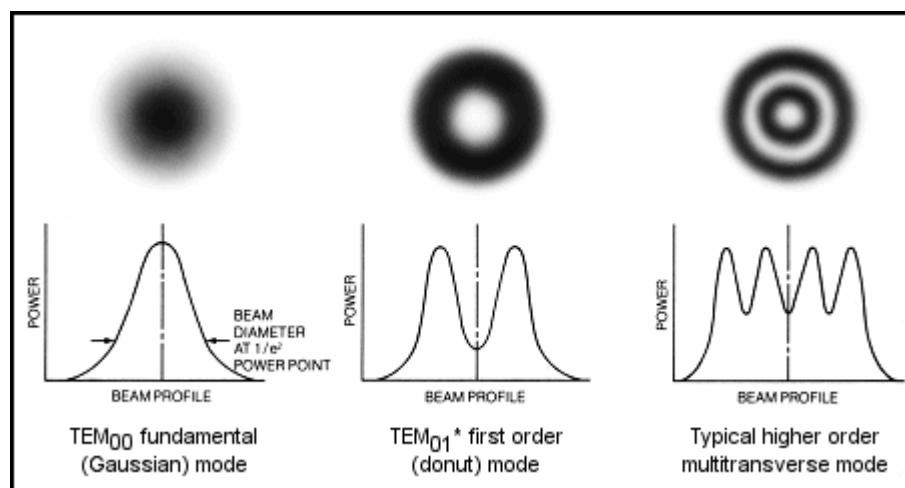


Abbildung 6: Darstellung verschiedener TEM-Moden [8]

Für das Laserstrahlschweißen ergeben sich prinzipiell zwei verschiedene Verfahren. Das Wärmeleitungsschweißen und das Tiefschweißen; welche in Abbildung 7 dargestellt sind.

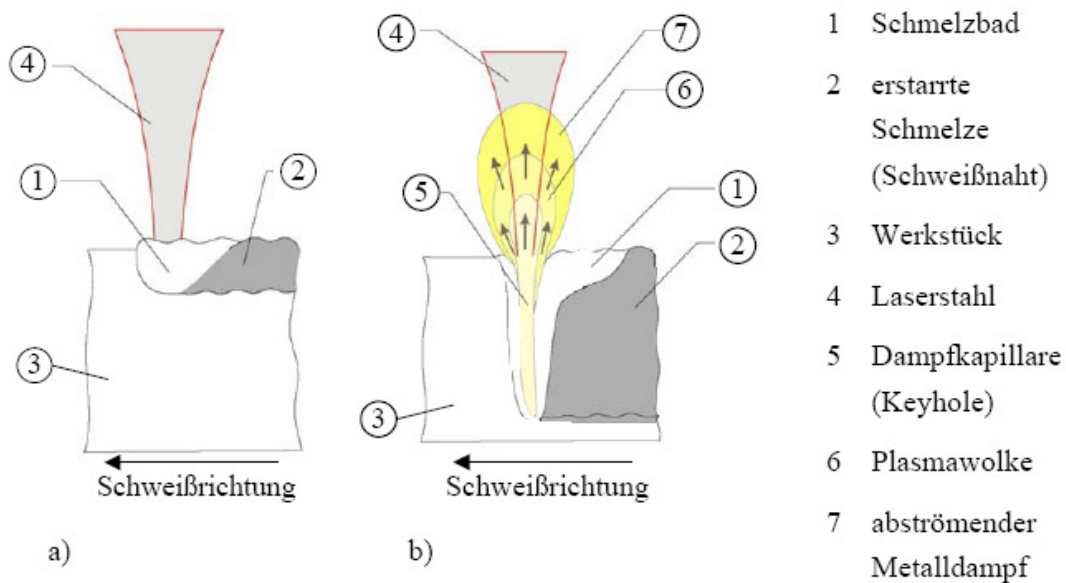


Abbildung 7: Prinzip des Wärmeleitungsschweißens a) und des Tiefschweißens b) [6]

Bei einer Leistungsflussdichte von 10^5 bis 10^6 W/cm² beginnt die Oberfläche aufzuschmelzen und größer als 10^6 W/cm² bildet sich der Tiefschweißeffect aus. Dabei treten zwei verschiedene Absorptionsvorgänge auf:

1) normale, material- und wellenlängenabhängige Absorption (Wärmeleitungsschweißen)

Diese tritt bis zu einer Leistungsflussdichte von etwa 10^5 W/cm² auf. Sie ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur des Werkstoffes. Je höher die elektrische Leitfähigkeit ist, desto geringer ist das Absorptionsvermögen. Metalle haben eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit und somit im Allgemeinen ein geringes Absorptionsverhalten. Dabei sinkt mit steigender Temperatur der Reflexionsgrad und die elektrische Leitfähigkeit. Außerdem nimmt die Absorption bis zum Erreichen des Schmelzpunktes zu. Bei Metallen findet die Reflexion nur an der Werkstückoberfläche statt ($\leq 1 \mu\text{m}$). Durch raue Oberflächen entsteht Vielfachreflexion, wodurch die Absorptionsrate zusätzlich erhöht wird.

2) anomale (intensitätsabhängige) Absorption (Tiefschweißen)

Anomale Absorption tritt ein, wenn die Strahlintensität einen kritischen Wert übersteigt. Dabei beträgt die Absorption nahezu 100 %. Ab dem Moment, wo die zugeführte Wärmemenge größer als die abgeführte ist, bildet sich durch lokales Verdampfen des Werkstückes ein Oberflächenplasma aus. Durch die anschließende Entstehung eines Einstichloches erhöht sich die Reflexion durch Vielfachreflexion. Bei ausreichender Strahlintensität entsteht durch Stoßionisation ein laserinduziertes Plasma. Die

Absorption im Plasma ist abhängig von der Strahlintensität, der Elektronendichte und der Elektronengastemperatur des Metaldampfplasmas. Durch den hydrostatischen Druck des abdampfenden Materials bildet sich ein tiefer und schlanker Dampfkanaal aus. Die Absorption innerhalb der Kapillare ist deutlich erhöht durch [9]:

- Absorption durch das Plasma oberhalb der Kapillare (Abbildung 8a)
- das Oberflächenplasma (Abbildung 8b)
- das Plasma in der Dampfkapillare (Abbildung 8c)
- „Selbstfokussierung“ der Kapillarwand durch Vielfachreflexion (Abbildung 8d).

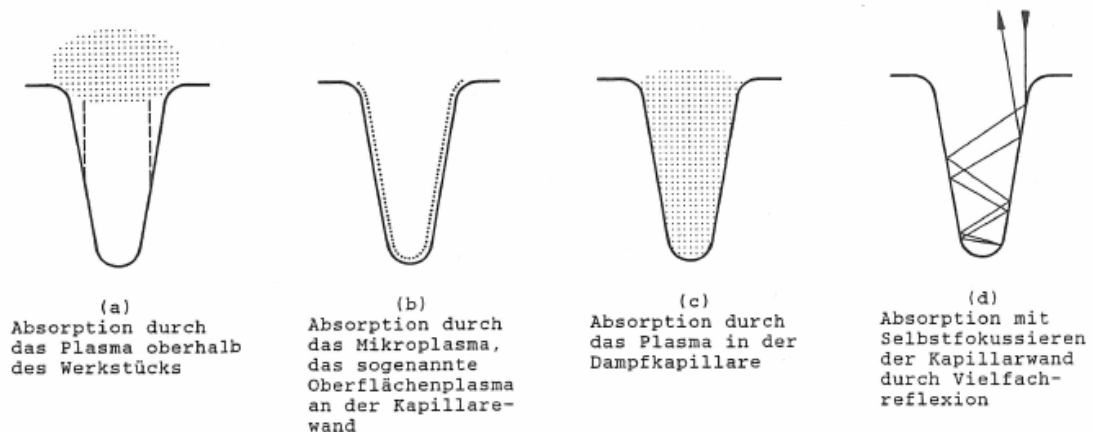


Abbildung 8: Modellvorstellung physikalischer Vorgänge der anomalen Absorption des Laserstrahls [9]

2.2.2. Charakteristik des Laserstrahls

Der Laserstrahl wird durch verschiedene Strahlparameter charakterisiert. Diese sind in DIN EN ISO 11145 genormt. Durch die Rayleighlänge z_R und den Strahldivergenzwinkel Θ lässt sich ein rotationssymmetrischer Strahl beschreiben (Abbildung 9). Die Rayleighlänge z_R gibt an, in welchem Abstand von der Strahltaile sich der Strahldurchmesser um $\sqrt{2}$ aufweitet.

$$z_R = \frac{\pi * d_0^2}{4 * \lambda} \quad (1)$$

Im Fernfeld ($z \ll z_R$) wächst der Strahlradius linear mit der Entfernung z und es ergibt sich der volle Divergenzwinkel Θ :

$$\Theta = \frac{d_0}{z_R} = \frac{4 * \lambda}{\pi * d_0} \quad (2)$$

Mit Hilfe des Strahlparameterproduktes wird der Laserstrahl beschrieben. Dies ist das Produkt aus Rayleighlänge z_R und Strahldivergenzwinkel Θ . Es lässt sich im Grundmode TEM₀₀ wie folgt berechnen:

$$\frac{d_0 * \Theta}{4} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (3)$$

Das Strahlparameterprodukt wird durch den Resonator beeinflusst und lässt sich nach Austritt aus dem teildurchlässigen Spiegel nicht mehr verbessern.

Bei höheren Transversalmoden sind der Strahltaillendurchmesser d_0 und der Strahldivergenzwinkel Θ um den Faktor M größer. Hier erhält man für das Strahlparameterprodukt:

$$\frac{d_0 * \Theta}{4} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (4)$$

M^2 wird Beugungsmaßzahl genannt und ist ein Maß für die Strahlqualität K des Laserstrahls:

$$K = \frac{1}{M^2} \quad (5)$$

Große Divergenzwinkel Θ führen zu $K < 1$. Somit stellt $K=1$ eine hohe Strahlqualität dar.

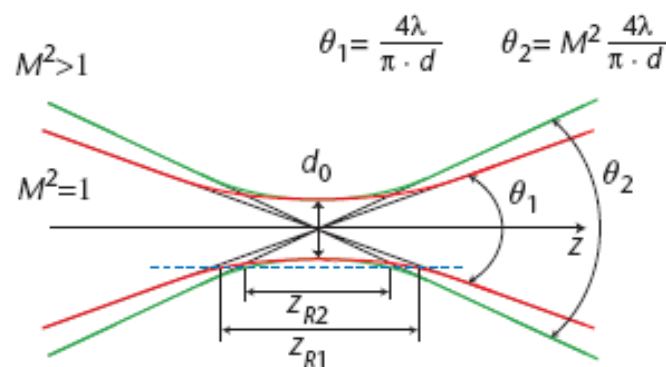


Abbildung 9: Ausbreitung eines Gaußstrahls ($M^2=1$, rot dargestellt) im Vergleich zu einem Strahlungsfeld mit geringerer Strahlqualität ($M^2>1$, grün dargestellt) bei gleichem Durchmesser d_0 der Strahltaille [10]

2.2.3. CO₂-Laser

Der für die industrielle Anwendung wichtigste Laser ist der CO₂-Laser. Hier findet als laseraktives Medium ein Gasgemisch aus CO₂, N₂ und He im Mischungsverhältnis 1:2:10 Anwendung [2]. Durch Anlegen einer Hochfrequenz- oder Gleichspannung wird zwischen zwei Elektroden eine Niederdruck-Gasentladung gezündet. Die dabei entstehenden freien Elektronen regen die N₂-Moleküle zum Schwingen an. Über Stöße geben diese ihre Energie an die CO₂-Moleküle ab. Dadurch werden sie auf das obere Laserniveau gepumpt. Bei dem Übergang auf das untere Laserniveau emittieren die CO₂-Moleküle das Laserlicht mit einer Wellenlänge von 10,6 µm. Von dort kehren sie in

den Grundzustand zurück. Helium dient aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit zur Kühlung des Gasgemisches.

Bauarten

Um den Prozess aufrecht zu erhalten müssen die anfallenden Dissoziationsprodukte CO und O_2 aus dem aktiven Gasvolumen entfernt werden. Deshalb muss das Gasgemisch regelmäßig erneuert werden, wodurch bauartbedingt in unterschiedliche Typen unterschieden wird. Es gibt quer- oder längsgeströmte Laser, diffusionsgekühlte Slab-Laser, sowie die abgeschlossene Bauart („sealed-off“).

Die quer- oder längsgeströmten Bauarten (Abbildung 10) benötigen eine ständige, frische Gaszuführung aus einer externen Quelle. Ihr Aufbau besteht aus einem wassergekühlten Glasrohr mit 1 bis 3 cm Durchmesser. In dem CO_2 - N_2 -He Gemisch wird eine Gleichstrom- oder Hochfrequenzentladung in axialer Richtung erzeugt. Die optimale Gaszusammensetzung hängt von dem Rohrdurchmesser, der Strömungsgeschwindigkeit des Gases und der Auskopplung ab.

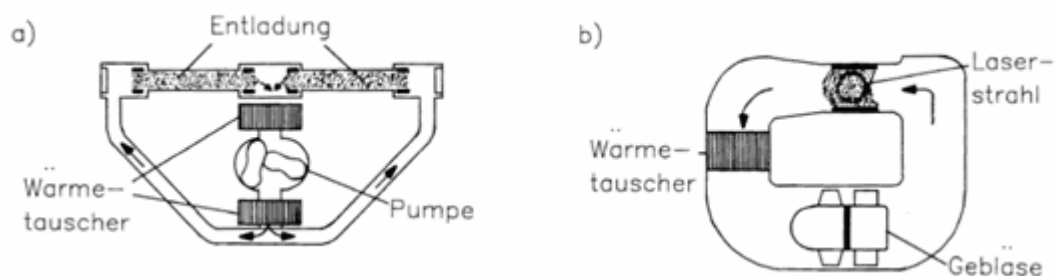


Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau längs- und quergeströmter CO_2 -Laser [11]

Slab-Laser unterscheiden sich in ihrer Bauart (Abbildung 11) derartig, dass sich das Gas zwischen zwei Kupferplatten befindet und nur in bestimmten Intervallen ausgetauscht werden muss. Durch den geringen Abstand der Platten ist eine gute Kühlung des Gases gewährleistet. Diese Bauart zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise, die hohe Strahlqualität und seine niedrigen Betriebskosten aus.

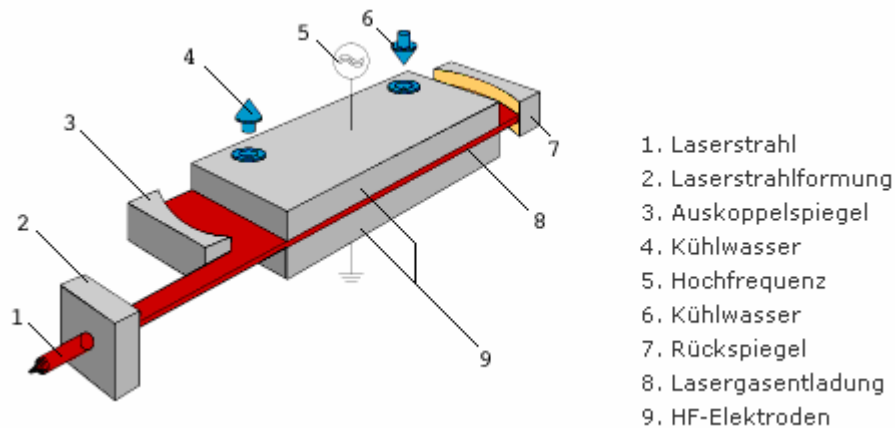


Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau eines CO₂-Slab-Lasers [12]

Die abgeschlossenen Laser stellen eine spezielle Bauart der Slab-Laser dar. Hier werden durch die Zugabe geringer Mengen von H₂O, H₂ oder O₂ die Dissoziationsprodukte CO und O₂ umgewandelt, so dass eine Frischgaszuführung nicht mehr nötig ist. Des Weiteren spielt das Elektrodenmaterial eine entscheidende Rolle, wobei Platin und Nickel als Katalysatoren für die Umwandlung von CO in CO₂ wirken. Die Gaszusammensetzung der abgeschlossenen Laser beträgt etwa 20 % CO₂, 20 % N₂ und 60 % He [11]. Die Ausgangsleistung ist aufgrund der Erwärmung des Gasgemisches, die zur thermischen Besetzung des unteren Laserniveaus führen kann, sowie durch die CO₂ Dissoziation begrenzt. Derzeit sind sealed-off-Laser mit bis zu 600 W (cw-Betrieb) bei mehreren tausend Betriebsstunden auf dem Markt verfügbar.

Gaslaser mit externer Gasversorgung sind bis zu einer Leistung von 100 kW erhältlich und haben einen Wirkungsgrad von ca. 10 % bis 20 % [11]. Ihre Anwendung liegt hauptsächlich im Schneiden, jedoch zunehmend auch im Schweißen. Weitere Verwendungen findet sie auf dem Gebiet der Oberflächenbearbeitung, wie Härten, Umschmelzen und Legieren [2].

Aufgrund der Wellenlänge von 10,6 µm lässt sich die Strahlung nur über Festkörperspiegel (z.B. Cu oder einkristallines Zinkselenid) zum Werkstück führen.

2.3. Hybridschweißverfahren

2.3.1. Grundlagen des Laserstrahl-MSG-Hybridschweißens

Prinzipiell wird bei Hybridverfahren zwischen der Verfahrenskombination und der Verfahrenskopplung unterschieden (Abbildung 12). Bei der Verfahrenskombination haben Laserstrahl und Lichtbogen keine gemeinsame Wirkzone und beeinflussen sich, bis auf indirekte Einflüsse, wie beispielsweise Vorwärmen, nicht gegenseitig.

Angewandt wird die Verfahrenskombination zum Beispiel bei Stumpfstößen, wo mit dem Laserstrahl die Wurzel geschweißt und die Decklage anschließend mit dem Lichtbogen aufgefüllt wird. Bei der Verfahrenskopplung befinden sich Laserstrahl und Lichtbogen in einer gemeinsamen Wirkzone und beeinflussen sich direkt. Für die Laserstrahl-MSG-Hybridverfahren werden CO₂- und Nd:YAG-Laser eingesetzt. Nachfolgend soll der Begriff „Hybrid“ als Abkürzung für das Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen dienen.

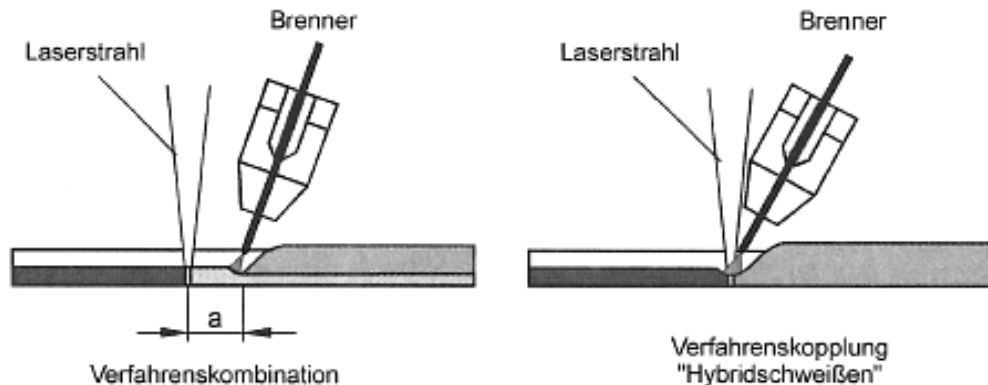


Abbildung 12: Verfahrensvarianten der Kombination von Lichtbogen und Laserstrahl [13]

Je nach Blechdickenbereich unterscheidet man in laserstrahl- oder lichtbogenunterstütztes Hybridschweißen [14]. Bis zu einer Blechdicke von 5 mm versteht man es eher als ein MSG-unterstütztes Laserstrahlschweißen. Hier soll durch den MSG-Prozess der Schweißzusatzwerkstoff eingebracht werden, um die Schweißgeschwindigkeit zu erhöhen und die benötigte Laserleistung zu minimieren. Gleichzeitig wird die Spaltüberbrückbarkeit im Vergleich zum reinen Laserstrahlschweißen mit Kaltdrahtzufuhr erhöht. Hingegen betrachtet man bei Blechdicken über 5 mm das Verfahren als laserunterstütztes MSG-Schweißen. Dabei dient der Laserstrahl dem Erreichen eines höheren Einbrandes und der Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit.

Die metallurgische Veränderung der Schmelze durch den Zusatzwerkstoff nimmt Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht und kann durch primär ferritisch erstarrende Zusatzwerkstoffe die Heißrissanfälligkeit reduzieren. Im Vergleich zu primär austenitisch erstarrender Schmelze liegen hier bei höheren Temperaturen vergleichsweise geringere Temperaturausdehnungskoeffizienten und eine höhere Verformbarkeit vor. Aufgrund der höheren Schweißgeschwindigkeit ist ein weiterer Vorteil des Hybridschweißens, im Vergleich zum reinen MSG-Schweißen, die geringer eingebrachte Streckenenergie.

Der Schutz der Schmelze vor der Atmosphäre erfolgt mit Helium oder Helium-Argon-Gemischen. Durch die Beimischung von Argon wird der Werkstoffübergang und die

Lichtbogenstabilität positiv beeinflusst. Die Beimischung von geringen Mengen Sauerstoff dient der besseren Tropfenbildung und –ablösung. Gleichzeitig bewirken Argon und Sauerstoff aufgrund ihrer geringeren Dissoziationsenergien das Einkoppeln der Laserstrahlung in das Lichtbogenplasma. Somit stellt die Zusammensetzung des Schutzgases einen Kompromiss zwischen Lichtbogenstabilität und Plasmaabschirmung für den Laserprozess dar. Als Schweißzusatzwerkstoff werden meist artgleiche MSG Massivdrähte eingesetzt [15].

Beim Hybridschweißen kann die Nahtform wesentlich durch die Parameter der einzelnen Schweißprozesse beeinflusst werden. Die Einschweißtiefe wird durch die Laserstrahlleistung und –form bestimmt. Der Haupteinfluss auf die Nahtbreite wird vorwiegend durch den Lichtbogen (Lichtbogenspannung) bestimmt. Durch den Lichtbogendruck wird die Schmelzbadoberfläche gesenkt, mittels Anpassung der Fokusslage kann die Einschweißtiefe erhöht werden [16]. Laserstrahlschweißen erzeugt schlanke und tiefe Nähte mit einem hohen Aspektverhältnis, MSG-Schweißen dagegen breite und überhöhte Nähte. Durch die Kopplung beider Prozesse in einer Prozesszone entsteht die typische kelchförmige Nahtform (Abbildung 13).

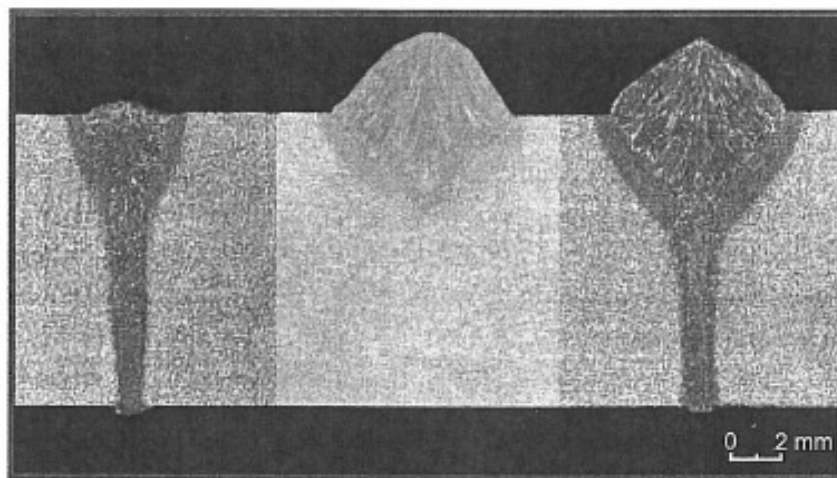


Abbildung 13: Typische Schweißnähte für die jeweiligen Prozesse; links: Laserstrahlschweißen; Mitte: MSG-Schweißen; rechts: Hybridschweißen [15]

Im Stahlbau gibt es derzeit keine allgemeine Zulassung für das Hybridschweißen. Die Qualifizierung erfolgte bisher in Anlehnung an die Regelwerke für das Lichtbogenschweißen, da keine Normen existieren.

Seit 2006 existiert eine Richtlinie des DNV (Det Norske Veritas) für die Qualifizierung und Zulassung des Hybridverfahrens [17]. Das DVS Merkblatt 3216 (01/2005) gibt allgemeine Hinweise zum Hybridschweißen. Weitere Regelwerke befinden sich in der Entwurfsphase [18], [19].

2.3.2. Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Lichtbogenplasma

Die Wechselwirkung der CO₂-Strahlung mit dem Lichtbogenplasma ist um den Faktor 100 größer als beispielsweise bei Nd:YAG-Strahlung. Abbildung 8 zeigt den Zusammenhang zwischen Absorptionskoeffizient und Wellenlänge für CO₂- und Nd:YAG-Strahlung im Lichtbogen unter Argon Schutzatmosphäre. Der Großteil der Plasmatemperatur beim Wolfram-Inertgas (WIG) Schweißen liegt in einem Temperaturbereich von 15.000 bis 23.000 K [20], [21]. Bei Plasmatemperaturen oberhalb von 14.000 K liegt eine Elektronendichte von etwa $1,5 - 2,0 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ vor [22]. Hier liegt für die CO₂-Strahlung der Absorptionskoeffizient in einem Bereich von $4 \times 10^1 \text{ m}^{-1}$ bis $6 \times 10^1 \text{ m}^{-1}$ und für Nd:YAG Strahlung bei $2 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ bis $4 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$. Somit werden etwa 40 % der CO₂ Laserleistung und nur etwa 0,3 % der Nd:YAG Laserleistung, die in ein Lichtbogenplasma eindringt, nach einer Strecke von 1 cm absorbiert.

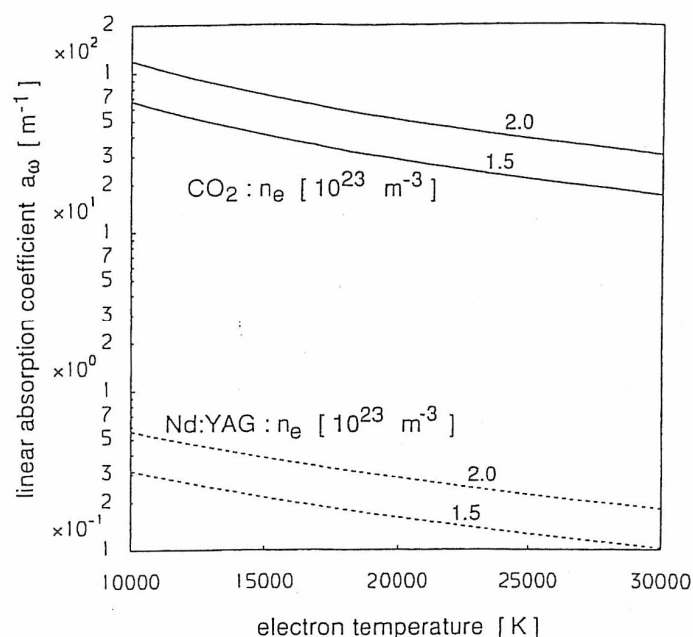


Abbildung 14: Linearer Absorptionsgrad für CO₂- und Nd:YAG-Laser in Abhängigkeit der Lichtbogentemperatur bei bestimmten Elektronendichten im Lichtbogen unter Argonatmosphäre [23]

Durch die Absorption der Laserstrahlung werden vermehrt Elektronen aus dem Lichtbogenplasma auf ein erhöhtes Energieniveau angehoben. Dadurch steigt die Ionisationsrate und somit die elektrische Leitfähigkeit des Lichtbogens. Für den Grad der Ionisierung der Schutzgasatmosphäre spielt, aufgrund der unterschiedlichen Dissoziationsenergien, die Art des Schutzgases ebenfalls eine erhebliche Rolle.

Weitere Effekte des Lasereinflusses können thermische Aktivierung und der Photoelektrische Effekt sein. Der Photoelektrische Effekt tritt ein, wenn ein Photon ein

auf der Oberfläche gebundenes Elektron, herauslöst. Dies ist nur möglich, wenn die Energie des Photons höher ist als die Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Material. Durch die thermische Aktivierung der Oberfläche wird zum einen die Elektronenaustrittsarbeit reduziert. Zum anderen können auch direkt Elektronen aus dem Metallgitter herausgelöst werden.

Diese beiden Effekte sind aufgrund der Wellenlängenabhängigen Absorption bei Nd:YAG-Strahlung von größerer Bedeutung. Weiterhin kann der Lichtbogen durch laserinduziertes Plasma stabilisiert werden. Aufgrund der zur Erzeugung von laserinduziertem Plasma erforderlichen hohen Energiedichte, kann bei der geringen notwendigen Laserleistung zur Stabilisierung des MAG-Prozesses, die Induzierung eines Plasmas mit cw-Lasern ausgeschlossen werden.

Aufgrund der thermischen Aktivierung und der guten Absorption der CO₂-Strahlung in dem Lichtbogenplasma, sollte sich der CO₂-Laser für Interaktionen mit dem Lichtbogenplasma am Besten eignen, um es in seiner Ausbreitungsrichtung zu beeinflussen oder zu stabilisieren.

2.3.3. Industrielle Anwendung

Der Einsatz des Hybridschweißens kommt einerseits in den Gewerben zur Anwendung, wo die Herstellung durch das Verbinden großer Blechdicken geprägt ist, andererseits wird es bei der Herstellung von Sonderprofilen angewandt.

Im Schiffbau wird, um Schweißarbeiten und Wegzeiten möglichst gering zu halten, in Modulbauweise gefertigt. Dank der geringen Streckenenergie der Hybridtechnik und dem damit verbundenen geringen Verzug der Bauteile können die Module in Abmessungen von 20 x 20 m vollautomatisch passgenau gefertigt werden. Vorher waren sie nur halb so groß. In den Jahren 2003 und 2004 wurde auf der Aker Werft in Rostock-Warnemünde gemeinsam mit IMG Rostock erstmals eine Einseitenschweißstation mit zwei diodengepumpten Nd:YAG-Lasern mit jeweils 4 kW Leistung installiert [24]. Durch entsprechende Optiken lagen somit für den Hybridprozess 8 kW Laserleistung in einem Brennfleck zur Verfügung. In der italienischen Werft Fincantieri in Montfalcone wurde im Jahr 2007 durch die IMG Rostock eine Einseitenschweißstation mit einem 10 kW Faserlaser installiert [24]. Solch ein 10 kW Faserlaser wurde im August 2004 erstmals an der SLV Mecklenburg-Vorpommern in Betrieb genommen. Die Hochleistungsfaserlaser haben in den letzten drei Jahren für einen Durchbruch der Faserlaser im Schiffbau gesorgt. Mittlerweile gibt es auch Scheibenlaser mit mehr als 8 kW Laserleistung. Diese stellen eine Alternative zu den Faserlasern dar.

Der Rostocker Sondermaschinen und Anlagenbauer ROSOMA GmbH fertigt für die SkySails GmbH & Co. KG den Teleskopmast für das Zugdrachen-Windantriebssystem. Dabei werden mittels Hybridtechnik 6 m lange U-Profile aus Schiffbaustahl D36 zu Hohlprofilen mit 8 und 10 mm Wandungsdicke verschweißt. Die verwendete Laserleistung beträgt 12 kW [19].

Das Forschungsprojekt „Untersuchungen zur Nutzung der Synergieeffekte beim Hochleistungs-Laserstrahlhybridschweißen von dickwandigen Rohrkörpern aus C-Mn-Stählen“ (Laserzentrum Hannover e.V.) hat bewiesen, dass auch dickwandige C-Mn-Stähle hybridschweißbar sind. Dabei wurden Blechdicken von 18 – 30 mm in Position PC untersucht. Die Versuche wurden mit einer Laserleistung von 12 kW (CO₂-Laser) durchgeführt. Eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zeigte, dass das Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen / UP-Schweißen gegenüber dem reinen UP-Schweißen bei gegebener Auftragslage die Herstellungskosten eines Rohres um 32 % reduziert [15].

Das Hybridschweißverfahren eignet sich auch für das Fügen von hochfesten Feinkornbaustählen, wie den S1100QL, welcher z. B. im Kranbau verwendet wird. Das Forschungsprojekt „Verfahrens- und systemtechnische Entwicklungen von Laserstrahlhybrid-Schweißverfahren zum Fügen von hochfesten Leichtbaustrukturen“ am Fraunhofer IWS Dresden hat dies gezeigt [25]. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen hierbei in einer deutlichen Steigerung der Produktivität, sowie einer deutlichen Reduzierung des Verzuges ohne Einschränkung von Festigkeit, Zähigkeit und Schwingfestigkeit im Vergleich zum konventionellen Schweißen.

Neben dem Fügen des Werkstoffes Stahl haben Forschungen ergeben, dass sich das Hybridverfahren auch für die im Leichtbau verwendeten Werkstoffe Aluminium und Magnesium anwenden lässt [16]. Vorteilhaft ist, dass bei stechender Anordnung der Laserstrahl die Aluminiumoxidschicht aufbricht und die Lichtbogenstabilität deutlich erhöht.

2.3.4. Lasergeführtes MSG-Schweißen

Eine der ersten Untersuchungen zum lasergeführten Schutzgasschweißen wurden unter anderem von Steen und Eboo im Jahre 1979 durchgeführt [26]. Dabei wurde mit einem CO₂-Laser ein WIG-Prozess unterstützt. Die Versuche wurden mit 1,8 kW Laserleistung und einem Schweißstrom kleiner 150 A durchgeführt. Der Laser wurde in verschiedenen Versuchen auf der Bauteilober- und Unterseite positioniert. Dabei fand Steen heraus, dass sich der Lichtbogen gezielt auf dem, durch den Laserstrahl erhitzten Fleck bewegt. Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten brennt der Lichtbogen

durch den Lasereinfluss, ohne instabil zu werden. Bei der Kopplung beider Verfahren in einer gemeinsamen Prozesszone, konnte die Einschweißtiefe erhöht werden.

Aktuelle Forschungsergebnisse mit dem WIG-Prozess wurden beispielsweise vom Laserzentrum Hannover [27], [28], [29] und der TU Braunschweig [9], [30], [31], [32] durchgeführt. Weiterhin wurden in der Literatur Untersuchungen an Aluminium mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern durchgeführt [33], [34], [35], [36]. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der CO₂-Laser sich hervorragend in Bezug auf Stabilisierung und Auslenkung des Lichtbogens [9], [28], [37], bzw. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit [5], [32], [37] eignet.

Durch den Einsatz eines 300 W CO₂-Lasers ist nach Cui [9] eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit einer auf Stahl (St37) geschweißten WIG Auftragsraupe um das 4,2-fache möglich. Nach C. E. Albright [33] lässt sich die Schweißgeschwindigkeit des WIG-Lichtbogens auf Aluminium mit einem CO₂-Laser um das 8-fache auf 30,5 m/min erhöhen. Bei einem MAG-Kurzlichtbogenprozess (1,6 kW) erzielte das Laserzentrum Hannover [27] mit einem Nd:YAG-Laser eine Auftragsraupe mit 2,5 m/min Schweißgeschwindigkeit auf blankem Stahl. Auf einer mit einem Primer (Korrosionsschutz) versehenen Oberfläche konnte bei gleichen Parametern nur noch eine Schweißgeschwindigkeit von 1,0 m/min erreicht werden. Bei diesen Versuchen wurde die Fokusslage von 0 bis +20 mm variiert. Dabei wurde das beste Ergebnis bei einer Defokussierung von +10 mm erreicht. Ab 200 W Laserleistung konnte eine Stabilisierung des Lichtbogens beobachtet werden. Das Laserzentrum Hannover untersuchte auch den Einfluss der Laserunterstützung auf die Einschweißtiefe. Dazu wurden mit WIG Auftragschweißungen auf Aluminium [28] und ein Stumpfstoß aus Hartmetall beidseitig geschweißt [29]. In beiden Versuchen konnte eine Zunahme der Einschweißtiefe beobachtet werden. Bei den Aluminiumversuchen wurde zusätzlich der Einfluss der Defokussierung untersucht. Dabei stellte sich auch hier eine Defokussierung als vorteilhaft heraus.

In Tabelle 1 sind einige Versuchsreihen von CO₂- und Nd:YAG-Lasern vergleichend gegenübergestellt. Tabelle 2 und 3 stellen das Einschweißverhalten in Abhängigkeit mit und ohne Nd:YAG-Laserunterstützung gegenüber.

Quelle	Material	Parameter	Laser
[27]	Stahl	$P_L > 0,2 \text{ kW}$ $P_{\text{MAG}} = 1,6 \text{ kW}$ $v_S = 2,5 \text{ m/min}$ (ohne Korr. Schutz) $v_S = 1,0 \text{ m/min}$ (mit Korr. Schutz)	Nd:YAG
[29]	Stahl	$P_L = 0,4 \text{ kW}$ $I = 150 \text{ A}$ $v_S = 2,0 \text{ m/min}$	Nd:YAG
[29]	Stahl	$P_L = 0,4 \text{ kW}$ $I = 90 \text{ A}$ $v_S = 1,0 \text{ m/min}$	Nd:YAG
[30]	X5CrNi18-10	$P_L = 0,19 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 100 \text{ A}$ $v_S = 6,5 \text{ m/min}$	CO ₂
[30]	X5CrNi18-10	$P_L = 0,17 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 130 \text{ A}$ (DCEN) $v_S = 6,5 \text{ m/min}$	CO ₂
[9]	St37	$P_L = 0,3 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 70 \text{ A}$ (DCEN) $v_S = 5,0 \text{ m/min}$	CO ₂
[9]	St37	$P_L = 0,1 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 90 \text{ A}$ (DCEN) $v_S = 1,5 \text{ m/min}$	CO ₂
[9]	St37	$P_L = 0,7 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 70 \text{ A}$ (AC) $v_S = 1,5 \text{ m/min}$	CO ₂
[33]	Aluminium 5052	$P_L = 0,6 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 50 \text{ A}$ (AC) $v_S = 30,5 \text{ m/min}$	CO ₂
[38]	Stahl Fe360	$P_L = 0,5 \text{ kW}$ $I_{\text{WIG}} = 50 \text{ A}$ (DCEN) $v_S = 0,25 \text{ m/min}$	Nd:YAG

Tabelle 1: ausgewählte Parameter für CO₂- und Nd:YAG-Laser nach [27], [29], [30], [9], [33], [38]

Fokuslage z_f	0 mm	+2 mm
Einschweißtiefe	0,6 mm	0,9 mm

Tabelle 2: Nd:YAG-Lasereinfluß auf Einschweißtiefe bei Aluminium ($P_L = 300 \text{ W}$) [28]

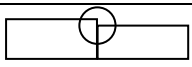
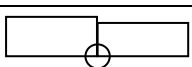
Nahtseite	$P_L = 0 \text{ W}$	$P_L = 400 \text{ W}$
	1,1 mm	1,5 mm
	1,3 mm	1,6 mm

Tabelle 3: Nd:YAG-Lasereinfluß auf Einschweißtiefe bei Hartmetall ($z_f = +4 \text{ mm}$) [29]

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Schwerpunkt dieser Arbeit ist es, den Einfluss eines CO₂-Laserstrahls niedriger Leistung auf den MAG-Prozess zu untersuchen, mit der Festlegung, die eingesetzte Laserleistung auf maximal 300 W zu begrenzen. Somit bleibt der MAG-Prozess mit seinem Leistungsspektrum von 1-30 kW der primäre Schweißprozess und dessen Vorteile erhalten. Zielsetzung ist der Einsatz eines abgeschmolzenen CO₂-Lasers. Aufgrund der Verfügbarkeit wurde für die Versuche ein 3,5 kW CO₂-Slab-Laser mit ähnlichen Leistungskennwerten verwendet. Durch den Einsatz eines abgeschmolzenen Lasers besteht die Möglichkeit, dieses System mit einem Roboter zu kombinieren, wodurch ein flexiblerer Einsatz möglich ist. Weiterhin sind die Anschaffungskosten eines 300 W Lasersystems wesentlich geringer wie die eines Lasers höherer Leistung bei nahezu gleicher Strahlqualität. Die gute Absorption der CO₂-Strahlung ist, neben den geringeren Anforderungen an den Strahlenschutz, bei dieser Wellenlänge gegenüber Festkörperlaser ein weiteres Argument für den Einsatz eines CO₂-Lasers.

Typische Automobilschweißgeometrien sind die Flankennähte. Hier brennt der Lichtbogen bevorzugt am Schenkel des Oberbleches anstelle des Wurzelpunktes der Naht, wodurch eine ungenügende Aufschmelzung des Unterbleches auftreten kann. Ziel dieser Arbeit ist es, bei hohen Schweißgeschwindigkeiten oder ungünstigen Nahtgeometrien, wie beispielsweise Versatz oder Spalt, den MAG-Prozess zu stabilisieren. Um ein sprunghaftes Wandern des Lichtbogens oder einseitiges Aufschmelzen der Bleche zu verhindern und einen sicheren Schweißprozess mit gleichmäßiger Naht zu gewährleisten.

Der Laserstrahl ist in Schweißrichtung vor dem MAG-Prozess positioniert und soll diesen unterstützen und stabilisieren, aber kein eigenes Schmelzbad wie beispielsweise beim Hybridschweißen, erzeugen. Durch erhöhte Schweißgeschwindigkeiten können kürzere Taktzeiten der Bauteilbearbeitung erreicht und somit der Bauteildurchsatz erhöht bzw. der Preis pro Stück reduziert werden. Der Aufwand der Nachbehandlungsschritte zum Richten des Verzuges kann ebenfalls minimiert werden.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob die Resultate der oben genannten Grundlagenuntersuchungen auf industrielle Aufgaben angewandt werden können. Dabei wird auf zwei Bereiche eingegangen, dem Automobil- und Schienenfahrzeugbau.

Im Bereich des Automobilbaus wird 1,5 mm dickes, höherfestes, verzinktes Blech (HX340LAD Z100) im Überlappstoß geschweißt. Hier besteht zum einen die

Problematik der genauen Positionierung des Brenners aufgrund ständig variierender Spaltmaße, zum anderen das Problem der Porenbildung durch verdampfendes Zink entlang der Schweißnaht.

Für den Schienenfahrzeugbau wird ebenfalls ein Überlappstoß untersucht. Hier werden zwei unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden. Als Unterblech dient 8 mm höherfester Baustahl (S355J2G4C+N), das Oberblech ist ein 1,5 mm dicker ferritischer Cromstahl (X2CrNi12+2B). Diese Werkstoffpaarung und Stoßgeometrie werden z. B. bei der Beplankung von Rahmengestellen an der Unterseite eingesetzt.

Es soll untersucht werden, ob das lasergeführte MAG-Verfahren bei diesen Werkstoffpaarungen und Schweißnahtgeometrien geeignet ist. Dafür sollen neben Auftragsschweißungen auch die genannte Stoßverbindung untersucht werden. Um den Einfluss des Laserstrahls zu untersuchen, soll systematisch der Abstand zwischen Laserstrahl- und Lichtbogenfußpunkt, sowie Laserleistung und Fokuslage, variiert werden. Die Versuche werden anhand von U-I-Messungen und Highspeedkameraaufnahmen dokumentiert.

Anschließend werden die Schweißnähte durch Sichtprüfung und Querschliffe begutachtet.

Eine Übersicht über die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit ist aus Abbildung 15 ersichtlich.

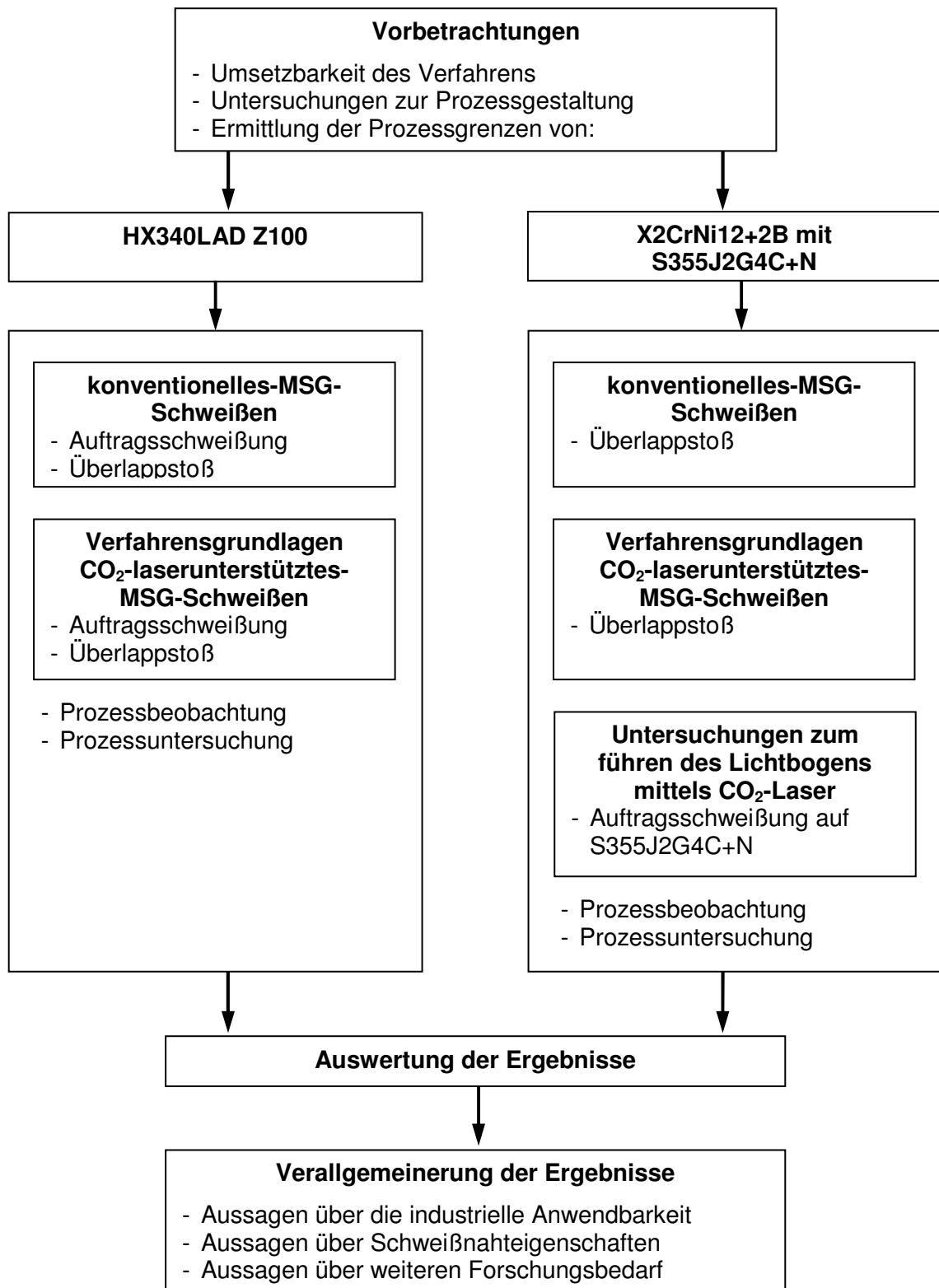


Abbildung 15: Schema der Vorgehensweise

4. Versuchsanlagen und Werkstoffe

4.1. Verwendete Anlagen

4.1.1. MSG-Stromquelle

Der überwiegende Teil der Versuche wurde mit der Stromquelle Merkle PU520 DW (Abbildung 16) durchgeführt. Für einzelne Versuche kam eine Elmatech Variomig 250 AC/DC (Abbildung 17) zum Einsatz. Bei der PU520 DW handelt es sich um eine frei programmierbare Transistor-Kaskade Stromquelle. Die Transistortechnologie und die elektronische Bauweise dieses Gerätes ermöglichen unterschiedlichste Schweißaufgaben durch die Anpassung der Stromkennlinie. Der Arbeitsbereich liegt von 12 – 40 V und 20 – 520 A.

Die Elmatech Variomig 250 AC/DC ist ebenfalls eine freiprogrammierbare Stromquelle mit einem Arbeitsbereich von 10 – 26,5 V und 10-250 A. Neben vorprogrammierten Kennlinien besteht auch hier die Möglichkeit, eigene Kennlinien zu nutzen.



Abbildung 16: Merkle PU520 DW



Abbildung 17: Elmatech Variomig 250 AC/DC

4.1.2. CO₂-Laser

Es kam ein 3,5 kW CO₂-Slab-Laser der Firma Rofin Sinar (DC035, Abbildung 18) mit den technischen Daten nach Tabelle 4 zum Einsatz. Um in dem Leistungsbereich eines abgeschmolzenen Lasers zu arbeiten, wurde die Leistungsgrenze auf 300 W begrenzt. Die Versuche wurde im TEM₀₀-Mode (Gauß-Mode) im cw-Betrieb (continuous wave) durchgeführt.

Ausgangsleistung P_L	3500 W
Wellenlänge λ	1,06 μm
Strahlkennzahl K	0,9
Brennweite f	300 mm
Fokusbereich d_{Fokus}	300 μm
Rayleighlänge z_R	3,61 mm

Tabelle 4: Technische Daten des verwendeten 3,5kW CO₂-Lasers (Rofin Sinar DC035)

Einschließlich des Fokussierspiegels lagen vier Spiegel im Strahlengang des Laserstrahls. Zum Einrichten von Laserstrahl und MSG-Brenner, sowie der Positionierung des Werkstückes, wurde ein roter He-Ne-Laser in den Strahlweg des CO₂-Lasers eingekoppelt.



Abbildung 18: verwendeter 3,5 kW CO₂-Laser (Rofin Sinar DC035)

4.1.3. Hybridkopf

Um eine exakte und reproduzierbare Positionierung des MSG-Brenners mit dem Laserstrahlfußpunkt zu gewährleisten, wurde ein eigens am IWS entwickelter Hybridkopf eingesetzt (Abb. 19). Über Mikrometerschrauben kann der MSG-Brenner genau in und quer zur Schweißrichtung am Kopf positioniert werden. Durch die Führung des MSG-Brenners in zwei Radiusschienen lässt er sich frei um den Prozessbearbeitungspunkt zwischen 45° und 67° zur Werkstückoberfläche drehen und mittels vier Schrauben anschließend definiert arretieren. Über eine Gewindeführung ist der MSG-Brenner auch in der Höhe variabel einsetzbar. Die Verwendung unterschiedlich langer Strahlführungsrohre ermöglicht den Einsatz von Fokussierspiegeln mit unterschiedlicher Brennweite. Somit ist der Hybridkopf für den Vorgang der Prozessoptimierung und der dazu notwendigen Variation von Winkeln oder Abständen optimal geeignet. In Tabelle 5 sind die möglichen Variationsparameter des Hybridkopfes zusammengefasst.

Da der verwendete MSG-Maschinenbrenner einen größeren Außendurchmesser hat wie die Aufnahme am Hybridkopf, musste diese neu konstruiert werden. Dafür wurde eine verschraubbare Befestigung aus 2 Halbschalen verwendet. Über diese kann der Brenner in einer weiteren linearen Achse eingerichtet werden.

Um die Stabilität des MSG-Brenners zu erhöhen, wurde dieser an dessen Ende mit einem Flexarm zusätzlich an dem Hybridkopf befestigt.

Um Laserstrahl und Brenner in einem möglichst kleinen Winkel zueinander anzuordnen, wurde an der Gasdüse des Brenners eine Aussparung angebracht (Abbildung 20). Dadurch konnte der Stickout und der Abstand zwischen Lichtbogenfußpunkt und Laserstrahlfußpunkt so gering wie möglich gehalten werden. Durch die Aussparung ist die Gasabdeckung aber nicht in jedem Fall ausreichend gewährleistet. Deswegen wurden verschiedene Aussparungsgrößen verwendet.

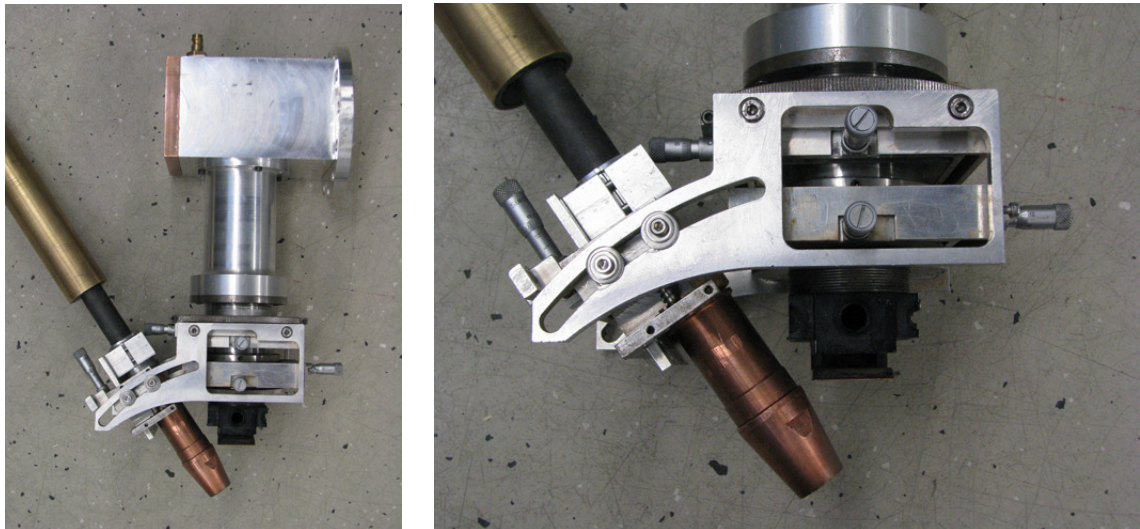


Abbildung 19: MSG-Laser-Hybridkopf (linkes Bild) und Brennerjustierschlitten (rechtes Bild)



Abbildung 20: Aussparung an Gasdüse

Abstand a in Schweißrichtung	+/- 3 mm
Abstand b quer zur Schweißrichtung	+/- 6 mm
Abstand zur Blechoberfläche	+/- 10 mm
Drehwinkel des Brenners um Prozessbearbeitungspunkt	zw. 45 – 67 °
Variation der Brennweite	Anpassung an alle Brennweiten in Abhängigkeit des verwendeten Strahlführungsrohres möglich

Tabelle 5: Variationsmöglichkeiten des verwendeten Hybridkopfes

4.1.4. Laserportalanlage

Die Versuche wurden an einer 5-Achsen Laserportalanlage durchgeführt (Abbildung 21). Der Hybridkopf war in vier Achsen beweglich. Wobei zwei Bewegungen linear (in Schweißrichtung und in Tiefenrichtung des Werkstückes) und zwei radial (die Neigung des Brenners zur Werkstückoberfläche und die Verdrehung um den Prozesspunkt) ausgeführt werden konnten. Die fünfte Achse, eine lineare, führt ein Vorschubtisch aus. Über der Naht befand sich eine, während des Prozesses nicht bewegte, Absaugung.

Um mögliche negative Einflüsse auf die Drahtförderung des MSG-Prozesses zu verhindern, befand sich der Drahtförderkoffer neben dem Vorschubtisch. Somit sind MSG-Brenner, Drahtförderkoffer und Schlauchpaket zu jedem Zeitpunkt unbeweglich gelagert und werden durch keinerlei Bewegungen beeinflusst.



Abbildung 21: Laserportalanlage

4.1.5. Prozessbeobachtung

Zur Prozessbeobachtung wurden die Versuche mit Highspeedkamera und zeitsynchroner U-I-Aufnahme, bei einer Abtastrate von 1 MHz und 3000 Bilder pro Sekunde beobachtet. Die Auflösung betrug 512x512 Pixel.

4.2. Werkstoffe

Die Anwendung des lasergeführten MSG-Schweißens ist in den Teilbereichen der Industrie sinnvoll, wo das MSG-Verfahren sich als effektiv erwiesen und behauptet hat, wo die Senkung der Streckenenergie erwünscht ist oder eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit weitere Wirtschaftlichkeit mit sich bringt. Das ist zum Beispiel im Automobil- und Schienenfahrzeugbau der Fall. Deshalb werden exemplarisch Werkstoffe für dieses Anwendungsgebiet untersucht

4.2.1. Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B

Als Oberblech bei der für den Schienenfahrzeugbau untersuchten Überlappverbindung wird ein X2CrNi12+2B (1.4003) verwendet. Der X2CrNi12+2B ist ein korrosionsträger, kaltgewalzter, ferritischer Chromstahl mit einer 0,2 % Dehngrenze bis zu 320 N/mm². Er weist ein ähnliches Verformungsvermögen wie Baustahl auf. Ferritische Chromstähle neigen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu starker Grobkornbildung und sollten deshalb mit einem möglichst geringem Wärmeeintrag geschweißt werden. Durch die Legierungsbestandteile Mangan und Nickel wird das Gefüge in der WEZ austenitisch umgewandelt und damit die Grobkornbildung vermindert. Sein niedriger Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt verhindert bei der Umwandlung von Austenit in Martensit eine zu starke Aufhärtung, wodurch sich sein günstiges Dauerschwing-, Festigkeits- und Biegeverhalten begründen lässt [39], [40]. Mit Ethanol wurde ein fettfreier Oberflächenzustand hergestellt.

Al	0,006	Cr	11,10	Co	0,0250
C	0,025	Ni	0,520	Ti	0,0050
Si	0,400	Cu	0,060	Nb	0,0080
Mn	1,050	Mo	0,030	B	0,0003
P	0,021	W	0,020	Ca	-
S	0,005	V	0,070	N	-

Tabelle 6: chem. Analyse des GW X2CrNi12+2B (Angaben in %)

4.2.2. Höherfester Baustahl S355J2G4C+N

Für das Unterblech der Überlappverbindung wird ein 8 mm dicker, unlegierter Stahlbaustahl S355J2G4C+N (1.0579) mit einer Streckgrenze von 355 N/mm² verwendet. Die Kerbschlagarbeit beträgt mindestens 27 J bei -20 °C. Er ist normalgeglüht oder normalisiert gewalzt und besonders kaltumformbar. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist etwas größer als der vom hochlegierten, nichtrostenden Stahl X2CrNi12+2B. Der Oberflächenzustand ist Sandgestrahlt Sa 2½ nach Norm DIN EN ISO 12944 Teil 4.

Al	0,038	Cr	0,046	Co	0,0090
C	0,125	Ni	0,046	Ti	0,0020
Si	0,200	Cu	0,053	Nb	0,0220
Mn	1,400	Mo	0,009	B	0,0003
P	0,014	W	0,003	Ca	0,0012
S	0,005	V	0,009	N	0,0075

Tabelle 7: chem. Analyse des GW S355J2G4C+N (Angaben in %)

4.2.3. Höherfester verzinkter Stahl HX340LAD Z100

Der HX340LAD Z100 (1.0933) wird häufig im Automobilbau als Strukturteil eingesetzt, z. B. für sicherheitsrelevante Elemente der Fahrgastzelle, Längsträger oder Elemente für Stoßfänger. Es ist ein mit Niob und Titan mikrolegierter, höherfester Stahl mit einer Streckgrenze von 340 N/mm². Er eignet sich für mäßige bis mittlere Verformungsbeanspruchung. Die gewünschte Streckgrenze wird durch Kornfeinung und Ausscheidungshärtung, sowie dem Hinzulegieren von weiteren festigkeitssteigernden Elementen wie Mangan hergestellt. Er ist beidseitig mit einer ca. 7 µm dicken Zinkschicht versehen. Die hier untersuchten Bleche haben eine Dicke von 1,5 mm und wurden im Überlappstoß geschweißt. Mit Ethanol wurde ein fettfreier Oberflächenzustand hergestellt.

Al	0,048	Cr	0,042	Co	0,0040
C	0,070	Ni	0,023	Ti	0,0020
Si	0,140	Cu	0,032	Nb	0,0280
Mn	0,780	Mo	0,006	B	0,0002
P	0,018	W	0,003	Ca	0,0001
S	0,005	V	0,005	N	0,0055

Tabelle 8: chem. Analyse des GW HX340LAD Z100 (Angaben in %)

4.2.4. Zusatzwerkstoff

G3Si1

Der Zusatzwerkstoff G3Si1 (DIN EN 440) ist für Verbindungen an un- und niedriglegierten Stählen im Stahlhoch-, Kessel-, Behälter-, Maschinen- und Fahrzeugbau unter argonreichen Mischgasen der Gruppe M12 bis M24 nach DIN EN 439 geeignet. Beim Schweißen unter Mischgasen der Hauptgruppe M3 oder CO₂ vermindert sich die Streckgrenze und Schweißgutzähigkeit. Der ZW kam mit einem Durchmesser von d_D = 1,0 mm zum Einsatz.

Al	0,02	Mo	0,15
C	0,06 – 0,14	Ni	0,15
Si	0,70 – 1,00	Zr	0,15
Mn	1,30 – 1,60	Ti	0,15

Tabelle 9: chem. Zusammensetzung des ZW G3Si1 nach DIN EN 440 (Angaben in %)

G18-8Mn

Der G18-8Mn (DIN EN ISO 14343-A) wird beim Fügen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen, sowie beim Fügen von artverschiedenen Stählen (unlegierte und legierte Bau- und Vergütungsstähle) eingesetzt. Weiterhin wird er für korrosionsbeständige Auftragsschweißungen verwendet. Das Schweißgut kann zu Mikrorissen oder Heißrissen neigen, da es in den meisten Fällen voll-austenitisch ist. Um dieser Rissneigung entgegen zu wirken, wird der ZW mit einem erhöhten Mangan-Gehalt versehen. Der ZW wurde mit einem Drahtdurchmesser von $d_D = 1,00 \text{ mm}$ eingesetzt.

C	< 0,20	S	< 0,03
Si	< 1,20	Cr	17,00 – 20,00
Mn	5,00 – 8,00	Ni	7,00 – 10,00
P	< 0,03	Mo	< 0,30

Tabelle 10: chem. Zusammensetzung des ZW G18-8Mn nach DIN EN ISO 14343-A (Angaben in %)

4.3. Theoretische Vorbetrachtung zum Schweißnahtgefüge

4.3.1. Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B mit Baustahl S355J2G4C+N

Das sich einstellende Schweißnahtgefüge lässt sich mit dem Schaeffler-Diagramm abschätzen. Das Diagramm gilt streng genommen nur für das Schweißnahtgefüge bei Erstarrungstemperatur. Bei unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten bleibt das Diagramm bei Raumtemperatur im Prinzip erhalten. Die Linien können sich jedoch verschieben. Die Werkstoffe X2CrNi12+2B und S355J2G4C+N werden mit dem austenitischen Zusatzwerkstoff G18-8Mn geschweißt. Beide Grundwerkstoffe weisen Martensitanteile auf, welche hart und spröde sind und somit eine geringe Duktilität aufweisen. Durch den austenitischen Zusatzwerkstoff entsteht ein duktileres Schweißnahtgefüge, womit die Gefahr der Härterissanfälligkeit minimiert wird. Bei einem Aufmischungsgrad von 50 % stellt sich ein austenitisch und martensitisches oder rein martensitisches Gefüge ein (Abbildung 22). Bei primär austenitisch erstarrendem Schweißgut besteht die Möglichkeit der Heißrissanfälligkeit. Der

Aufmischungsgrad kann durch die seitliche Positionierung und den Anstellwinkel α des MSG-Brenners, dem Stickout, sowie durch die Schweißspannung beeinflusst werden. Da über diese Parameter das anteilige Aufschmelzen der einzelnen Grundwerkstoffe variiert werden kann.

Schweißnaht mit 50 % Auflegung

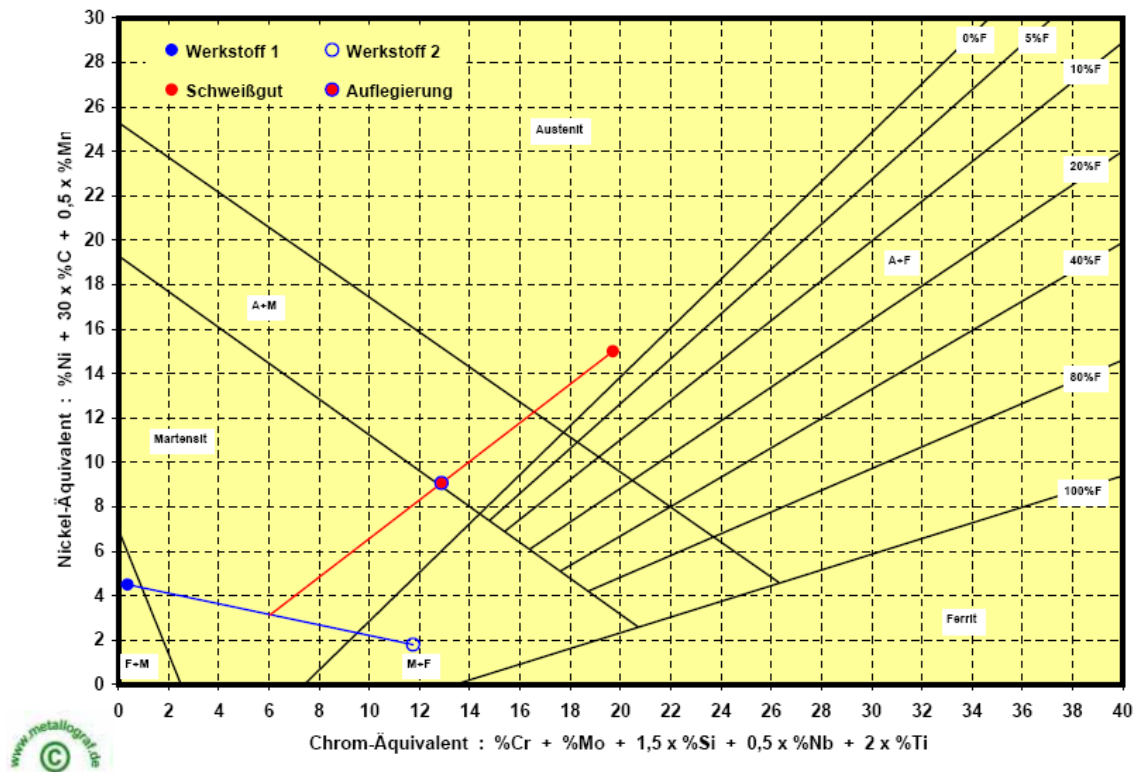


Abbildung 22: zu erwartendes Schweißnahtgefüge der Verbindung von S355J2G4C+N (Werkstoff 1) mit X2CrNi12+2B (Werkstoff 2) mit dem Schweißgut G18-8Mn (1.4370) laut Schaeffler [41]

4.3.2. Verzinktes Stahlblech HX340LAD Z100

Durch den Einsatz des niedriglegierten ZW G3Si1 besteht bei einem sehr geringen Aufmischungsgrad die Möglichkeit, dass sich rein martensitisches Gefüge ausbildet. Für größere Aufmischungsgrade entsteht bei der Verbindung des verzinkten Stahlbleches α -ferritisch und martensitisches. Für rein martensitisches und für α -ferritisch und martensitisches Gefüge besteht die Möglichkeit der Härterissanfälligkeit, welche für diesen Werkstoff aber unkritisch ist. Da der HX340LAD Z100 einen sehr geringen Kohlenstoffgehalt ($C = 0,07\%$) aufweist und mit Niob und Titan stabilisiert ist.

5. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden auf einem in Schweißrichtung verfahrbaren Tisch durchgeführt. Der Schweißbrenner wurde in einem eigens dafür angefertigten Hybridkopf befestigt und ist in einem Winkel $\beta = 55^\circ$ in Schweißrichtung positioniert (Abbildung 23). Für die Überlappverbindung wurden orthogonal zur Schweißrichtung, Laserstrahl und Brenner im Winkel von $\alpha = 62^\circ$ zur Werkstückoberfläche angeordnet und in die Kehle der Naht ausgerichtet, um beide Nahtflanken sauber anzuschmelzen (Abbildung 24). Für die Auftragsschweißung wurde ein Winkel von $\alpha = 90^\circ$ eingestellt. Der Brenner ist stechend angeordnet. Seine Position zum Laserstrahlfußpunkt lässt sich definiert festlegen und wurde in verschiedenen Versuchsreihen in Schweißrichtung zwischen 0,2 mm und 5 mm variiert. Bei dem Überlappstoß des höherfesten, verzinkten Stahles HX340LAD Z100 wurde zwischen beiden Blechen ein Spalt s von 0,2 mm eingestellt, um eine optimale Zinkausgasung zu ermöglichen. Der hochlegierte nichtrostende Stahl X2CrNi12+2B wurde ohne Spalt auf den höherfesten Baustahl S355J2G4C+N angeordnet.

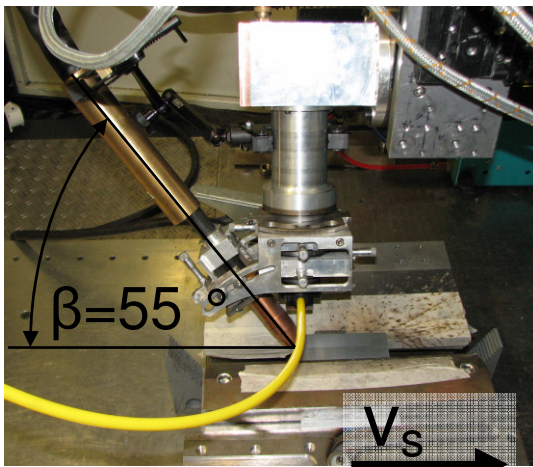


Abbildung 23: Ansicht des Versuchsaufbaus quer zur Schweißrichtung

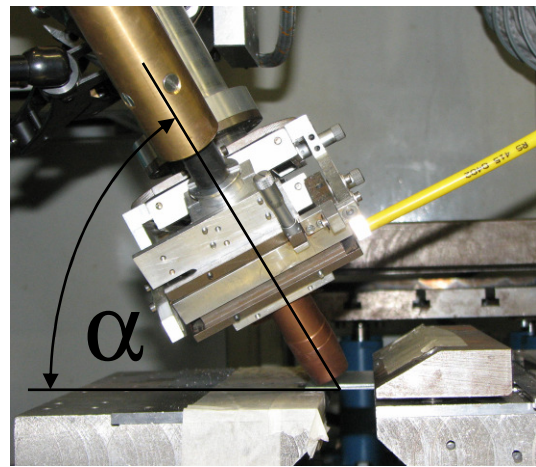


Abbildung 24: Ansicht des Versuchsaufbaus in Schweißrichtung

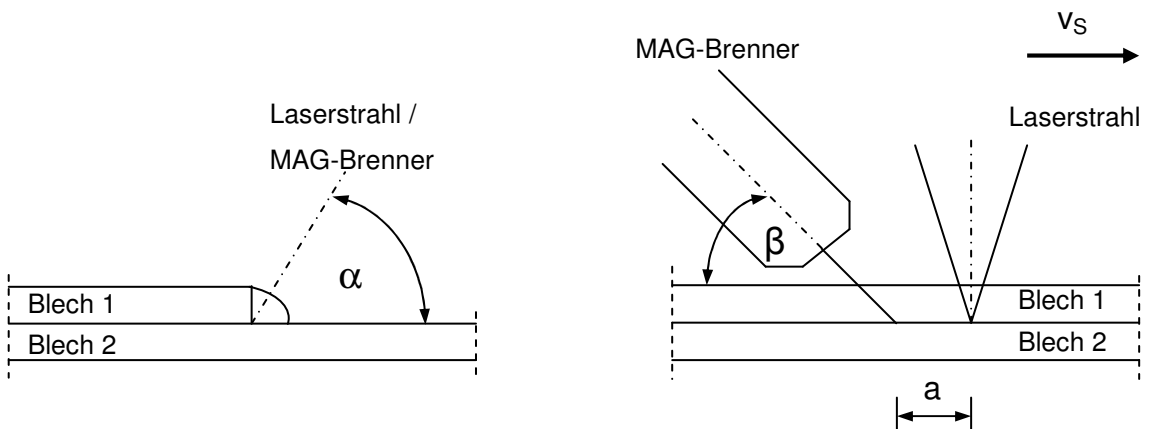


Abbildung 25: Darstellung der Fugestelle; links: Ansicht in Schweißrichtung ; rechts: Seitenansicht

In den durchgeführten Versuchsreihen wurde zuerst die konventionelle Verfahrensgrenze des MAG-Schweißens ermittelt. Dabei wurde bei konstanter Schweißspannung / –Strom und Drahtvorschub die Schweißgeschwindigkeit bis zur Prozessgrenze gesteigert. Anschließend wurde durch Zuschalten des Laserstrahls und der Variation von:

- Laserleistung P_L ,
- Brennfleckdurchmesser d_{Spot} ,
- sowie Abstand a zwischen Laser- und Lichtbogenfußpunkt (Abbildung 25)

der Einfluss auf die maximale Schweißgeschwindigkeit v_s bei konstanter Schweißspannung / –Strom und Drahtvorschub untersucht.

Aufgrund von Absorption der Laserleistung auf den Spiegeln im Strahlengang trifft auf dem Werkstück nicht die tatsächlich eingestellte Laserleistung auf. Die bei den Versuchen angegebene Laserleistung entspricht der durch Messungen ermittelten Leistung nach Abbildung 26.

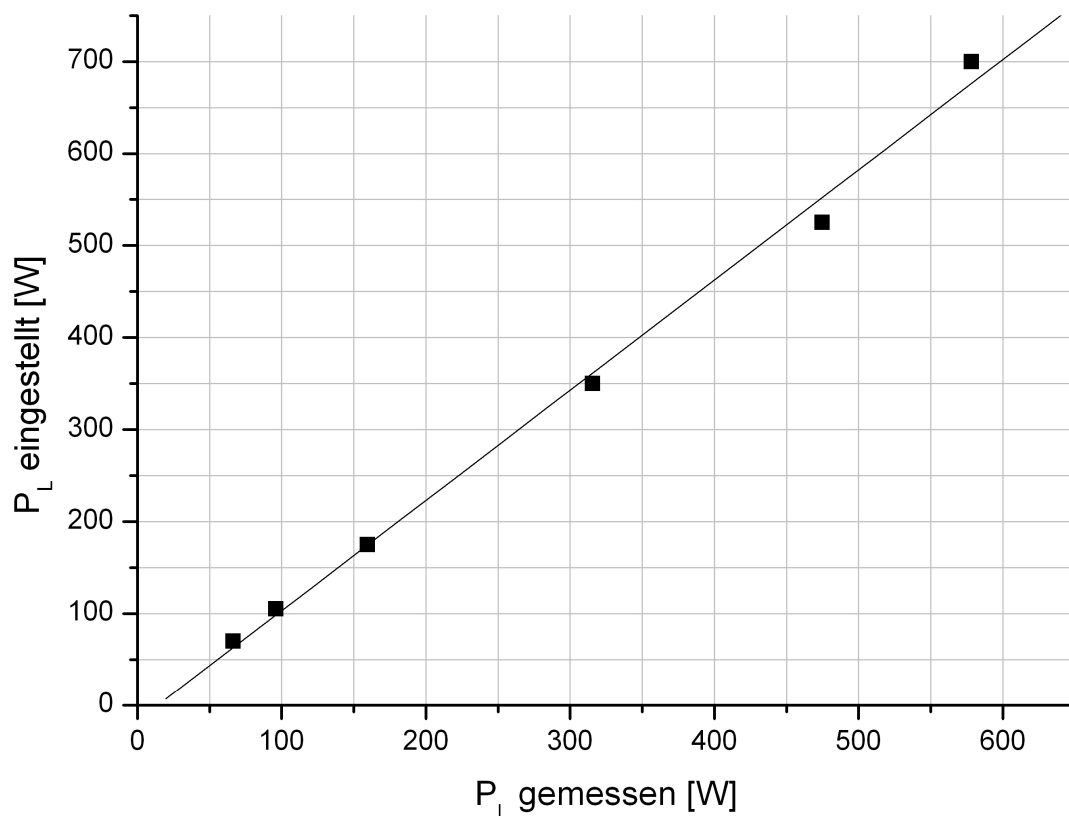


Abbildung 26: Vergleich der tatsächlichen (P_L eingestellt) mit der eingestellten (P_L gemessen) Laserleistung

Für die Untersuchungen mit dem verzinkten Stahlblech HX340LAD Z100 wurde der Zusatzwerkstoff G3Si1 mit dem Durchmesser $d_D = 1,0$ mm verwendet. Bei der Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N kam der Zusatzwerkstoff G18-8Mn mit dem Durchmesser $d_D = 1,0$ mm zum Einsatz. Das verwendete Schutzgas war in beiden Fällen ein Mischgas mit 18 % CO_2 und 82 % Argon (nach DIN EN 439 - M21). Der Prozess wurde mittels High-Speed-Kamera und Spannung- / Strommessung dokumentiert (Abbildung 27). Eine Parameterübersicht für die Auftragsschweißungen ist in Abbildung 28 und für die Überlappverbindung in Abbildung 29 dargestellt.

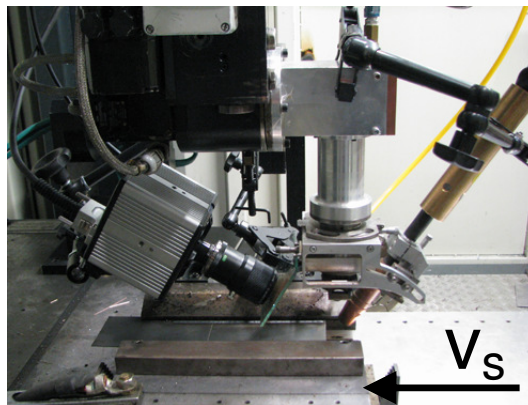


Abbildung 27: Versuchsaufbau mit High-Speed-Kamera

Auftragsschweißung HX340LAD Z100

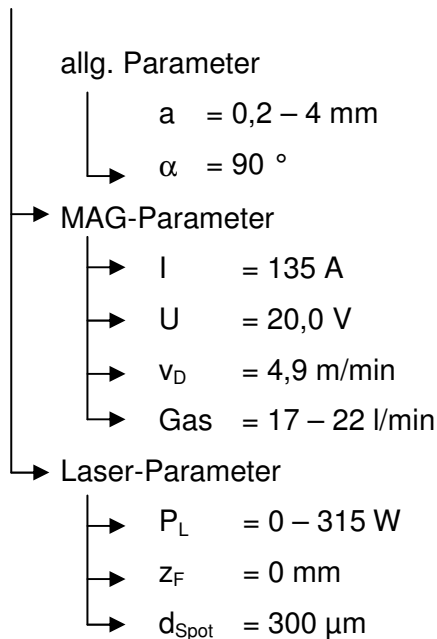
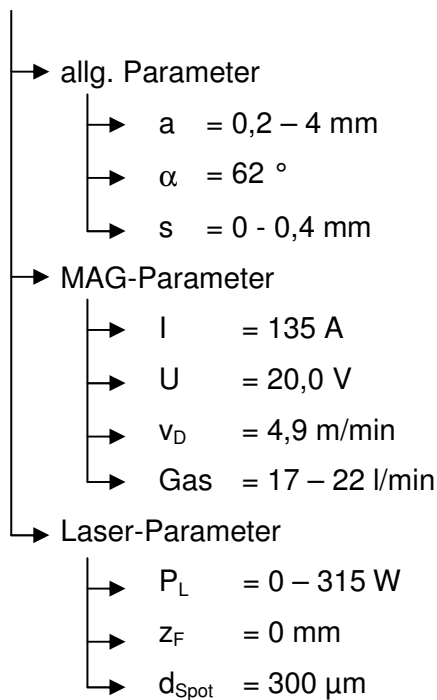


Abbildung 28: Parameterübersicht für die Auftragsschweißung für HX340LAD Z100 und für S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B

Überlappstoß HX340LAD Z100



Überlappstoß S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B

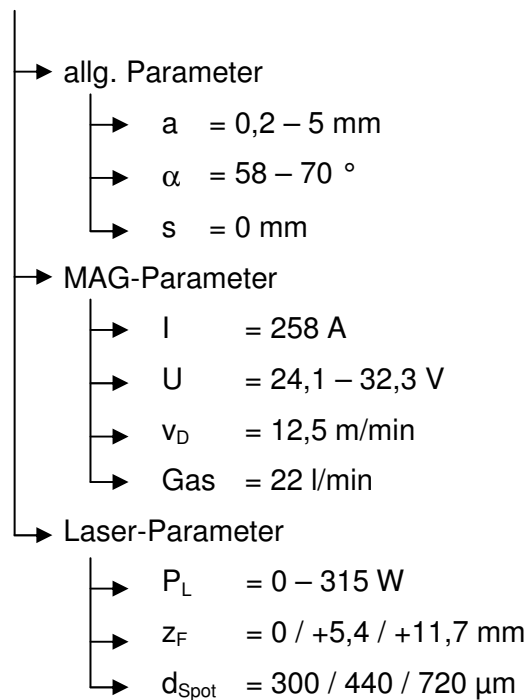


Abbildung 29: Parameterübersicht für den Überlappstoß für HX340LAD Z100 und für S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B

6. Prozessuntersuchung zum lasergeführten MAG-Schweißen

6.1. Einfluss des Laserstrahls auf die Schweißgeschwindigkeit

6.1.1. Verzinktes Stahlblech HX340LAD Z100

Verfahrensgrenzen des konventionellen MAG-Schweißen

Auftragsschweißung

Als Grundlage für die laserunterstützten MAG Versuche wurden für den HX340LAD Z100 Voruntersuchungen als Auftragsschweißung und Überlappstoß durchgeführt. Hierfür wurden mit dem reinen MAG-Prozess die konventionellen Verfahrensgrenzen ermittelt. Aufgrund der geringen Blechdicke wurde im Kurzlichtbogenbereich mit folgenden Parametern geschweißt:

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_s	$\leq 1,8 \text{ m/min}$	I	135 A	P_L	-
a	-	U	20,0 V	z_F	-
α	90 ° (PA)	v_D	4,9 m/min	d_{Spot}	-
s	-	Gas	17 l/min		

Tabelle 11: Parameter für die Auftragsschweißung von HX340LAD Z100

Für die Auftragsschweißung wurden die 1,5 mm dicken Bleche in der Position PA verschweißt. Dabei liegt die Obergrenze der Schweißgeschwindigkeit bei $v_s = 1,8 \text{ m/min}$, $E = 0,09 \text{ kJ/mm}$ (Abbildung 30). Die Schweißnaht weist ein homogenes, feinschuppiges und porenfreies Nahtaussehen ohne Einbrandkerben auf. Die Nahtbreite beträgt 5,3 mm mit einer Nahthöhe von 0,9 mm. Bei $v_s = 2,0 \text{ m/min}$ liegt ein wesentlich ungleichmäßigeres und grobschuppigeres Nahtaussehen mit Einbrandkerben an den Nahtaußenseiten vor (Abbildung 31).



Abbildung 30: Auftragsnaht (#18) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 $E = 0,09 \text{ kJ/mm}$



Abbildung 31: Auftragsnaht (#20) mit:
 $v_s = 2,0 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$

Bei der Berechnung der Streckenenergie wurde der Beiwert k , welcher den thermischen Wirkungsgrad des verwendeten Schweißverfahren berücksichtigt, außer Acht gelassen. Für den Laserprozess ist dieser Beiwert sehr stark von der Absorptionsrate der Laserstrahlung abhängig und nicht ohne Weiteres eindeutig bestimmbar. Die Absorptionsrate wird von der Werkstücktemperatur, der Ausbildung eines Dampfkanals sowie von dem Lichtbogenplasma aufgrund der Wechselwirkung zwischen CO_2 -Strahlung und Lichtbogenplasma beeinflusst. Berechnet wurde E mit den prozesstechnisch zur Verfügung gestellten Leistungen. Für weitergehende Betrachtungen wie beispielsweise der Berechnung des Schweißverzuges muss k mit berücksichtigt werden. Somit ergibt sich die Streckenenergie nach folgender Formel:

$$E = \frac{U * I}{v_s} * 10^{-3} + \frac{P_{L, Ist}}{v_s} * 10^{-3} \quad (6)$$

mit I in [A], U in [V], P in [W] und v_s in [mm/s].

Überlappstoß

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_s	$\leq 0,8 \text{ m/min}$	I	135 A	P_L	-
a	-	U	20,0 V	z_F	-
α	62 ° (PB)	v_D	4,9 m/min	d_{Spot}	-
s	0,2 mm	Gas	22 l/min		

Tabelle 12: Parameter für die Überlappverbindung von HX340LAD Z100

Der Überlappstoß wurde in der Position PB mit den Parametern nach Tabelle 12 ausgeführt. Beim Schweißen von verzinkten Blechen besteht das Problem, dass Zinkoxiddämpfe entstehen. Wenn diese nicht in ausreichendem Maße entweichen können, sorgen sie für eine starke Porenbildung im Schweißgut. Durch das Einstellen eines definierten Luftspaltes ab 0,2 mm zwischen den beiden zu verbindenden Blechen, konnte eine Zinkoxidgasentweichung erreicht werden. Sie reichte jedoch nicht

immer aus, um die Bildung von Poren zu verhindern. Ein größerer Spalt führte zu keinen besseren Entgasungsergebnissen.

Wie in Abbildung 32 dargestellt, wird bis $v_s = 0,8 \text{ m/min}$ ($E = 0,20 \text{ kJ/mm}$) eine fehlerfreie, homogene und feinschuppige Schweißnaht ohne Einbrandkerben erreicht. Die Nahtbreite beträgt 6 mm. Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten können im Schweißgut vermehrt Poren auftreten. Ab $v_s = 1,3 \text{ m/min}$ treten Bindefehler auf (Abbildung 33). In Abbildung 34 sieht die man die von der Schmelzgrenze aus wachsenden Stengelkristalle. Durch die Überlappverbindung werden die niedrigschmelzenden Verunreinigungen durch die erstarrenden Stengelkristalle an die Nahtoberfläche transportiert. Im schmelznahen Bereich der WEZ bildete sich Grobkorn.



Abbildung 32: Überlappverbindung (#102) mit:
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 $E = 0,20 \text{ kJ/mm}$



Abbildung 33: Überlappverbindung (#105) mit:
 $v_s = 1,3 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$

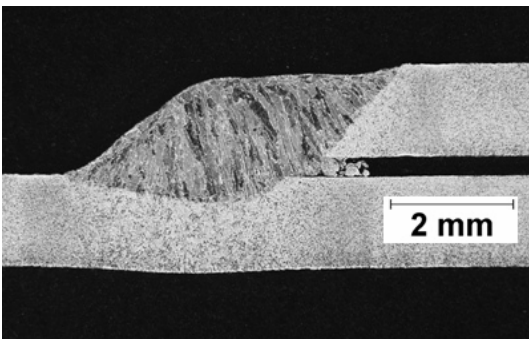


Abbildung 34: Querschliff einer Überlappverbindung (#102) mit:
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 $E = 0,20 \text{ kJ/mm}$

Verfahrensgrenzen lasergeführtes MAG-Schweißen

Auftragsschweißung

Anhand der ermittelten Verfahrensgrenzen für das konventionelle MAG-Schweißen wurde bei höheren Schweißgeschwindigkeiten mit Laserunterstützung geschweißt. Dabei wurden folgende Parameter verwendet:

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_S	≤ 2,2 m/min	I	135 A	P_L	≤ 190 W
a	0,2 – 4 mm	U	20,0 V	z_F	0 mm
α	90 ° (PA)	v_D	4,9 m/min	d_{Spot}	300 μm
s	-	Gas	22 l/min		

Tabelle 13: Parameter für die laserunterstützte Auftragsschweißung von HX340LAD Z100

Hier lässt sich die Schweißgeschwindigkeit bei $a = 0,2$ mm auf $v_S = 2,1$ m/min (Abbildung 35) mit $P_L = 66$ W ($E = 0,08$ kJ/mm) und bei $a = 1$ mm auf $v_S = 2,2$ m/min (Abbildung 36) mit $P_L = 190$ W ($E = 0,08$ kJ/mm) erhöhen. Die Steigerung der Schweißgeschwindigkeit von $v_S = 2,1$ m/min auf $v_S = 2,2$ m/min konnte jedoch nur durch die Erhöhung der Laserleistung von 66 W auf 190 W realisiert werden. Sie erbrachte keine Senkung der Streckenenergie. Im Vergleich zu der Schweißgeschwindigkeit ohne Laserunterstützung konnte um 22 % ($\Delta v_S = 0,4$ m/min) schneller geschweißt werden, bei einer Reduzierung der Streckenenergie um 11 % ($\Delta E = 0,01$ kJ/mm). Beide Schweißnähte weisen ein homogenes, feinschuppiges und porenfreies Nahtaussehen, ohne Einbrandkerben auf. Die Nahthöhe beträgt 0,9 mm und die Nahtbreite 5,1 mm. Im Vergleich zum Schweißen ohne Laserunterstützung ist sie um 0,2 mm schmaler.



Abbildung 35: Auftragsnaht (#56) mit:
 $v_S = 2,1$ m/min,
 $a = 0,2$ mm,
 $P_L = 66$ W,
 $I = 135$ A,
 $U = 20,0$ V,
 $E = 0,08$ kJ/mm



Abbildung 36: Auftragsnaht (#78) mit:
 $v_S = 2,2$ m/min,
 $a = 1$ mm,
 $P_L = 190$ W,
 $I = 135$ A,
 $U = 20,0$ V,
 $E = 0,08$ kJ/mm

Überlappstoß

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_S	≤ 1,6 m/min	I	135 A	P_L	≤ 315 W
a	0,2 mm	U	20,0 V	z_F	0 mm
α	62 ° (PB)	v_D	4,9 m/min	d_{Spot}	300 μm
s	0,2 mm	Gas	22 l/min		

Tabelle 14: Parameter für die laserunterstützte Überlappverbindung von HX340LAD Z100

Für die Überlappverbindung wurden die Parameter nach Tabelle 14 verwendet. Dabei konnte die Geschwindigkeit von $v_s = 0,8 \text{ m/min}$ auf $v_s = 1,6 \text{ m/min}$ durch 253 W Laserleistung erhöht werden, Abbildung 37 und 39 ($E = 0,11 \text{ kJ/mm}$). Das entspricht einer Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit v_s um 100% ($\Delta v_s = 0,8 \text{ m/min}$) bei gleichzeitiger Reduzierung der Streckenenergie um 45% ($\Delta E = 0,09 \text{ kJ/mm}$). Die Nahtbreite dieser Schweißnaht beträgt 5 mm und ist 1 mm schmaler als die Naht ohne Laserunterstützung. Das Nahtaussehen ist homogen, feinschuppig, porenfrei und ohne Einbrandkerben. Aufgrund der höheren Schweißgeschwindigkeit weisen die Nahtländer weniger Schmelzgut auf als die Naht ohne Laserunterstützung, wodurch sie in Nahtmitte stärker überwölbt ist. Bei weiterer Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit treten Bindefehler auf (Abbildung 38). Durch die erhöhte Schweißgeschwindigkeit entsteht im Gegensatz zum konventionellen Schweißen eine deutlich kleinere Wärmeeinflusszone (vgl. Abbildung 34 mit 39). Hierdurch liegt ein größerer Härtegradient vor. Ob die Reduzierung der Wärmeeinflusszone auf die Gebrauchstauglichkeit der Verbindung einen Einfluss hat, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Dies war nicht Gegenstand dieser Arbeit.



Abbildung 37: Überlappverbindung (#119) mit:
 $v_s = 1,6 \text{ m/min}$,
 $a = 0,2 \text{ mm}$,
 $P_L = 253 \text{ W}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 $E = 0,11 \text{ kJ/mm}$



Abbildung 38: Überlappverbindung (#120) mit:
 $v_s = 1,7 \text{ m/min}$,
 $a = 0,2 \text{ mm}$,
 $P_L = 253 \text{ W}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$

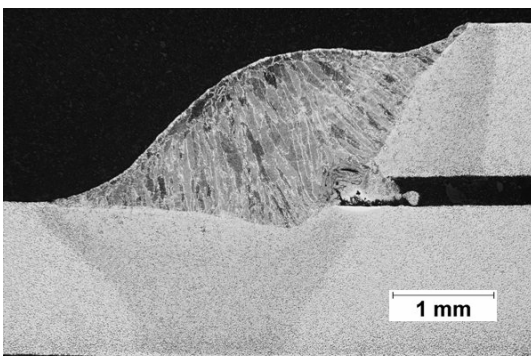


Abbildung 39: Querschliff einer Überlappverbindung (#119) mit:
 $v_s = 1,6 \text{ m/min}$,
 $a = 0,2 \text{ mm}$,
 $P_L = 253 \text{ W}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 $E = 0,11 \text{ kJ/mm}$

Abbildung 40 beschreibt näherungsweise ein Prozessfenster des laserunterstützten MAG-Prozesses für die Überlappverbindung des HX340LAD Z100. In diesem Diagramm ist die Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der eingesetzten Laserleistung dargestellt. Die gezeigten Grenzen sind näherungsweise eingezeichnet. Ihr Verlauf ist in weiteren Versuchen genauer festzulegen. Bis etwa 66 W kann keine Beeinflussung des Prozesses beobachtet werden. Aufgrund der geringen Laserleistung kann nicht gewährleistet werden, dass der 3,5 kW CO₂-Laser diese konstant auskoppelt. Dies kann ein Grund für den instabilen Bereich sein. Bei weiterer Leistungserhöhung tritt verstärkt Porenbildung als Nahtimperfection bei zu hoher Schweißgeschwindigkeit auf. Ab 190 W Laserleistung ist das Nahtversagen durch Bindefehler an den Nahtflanken gekennzeichnet.

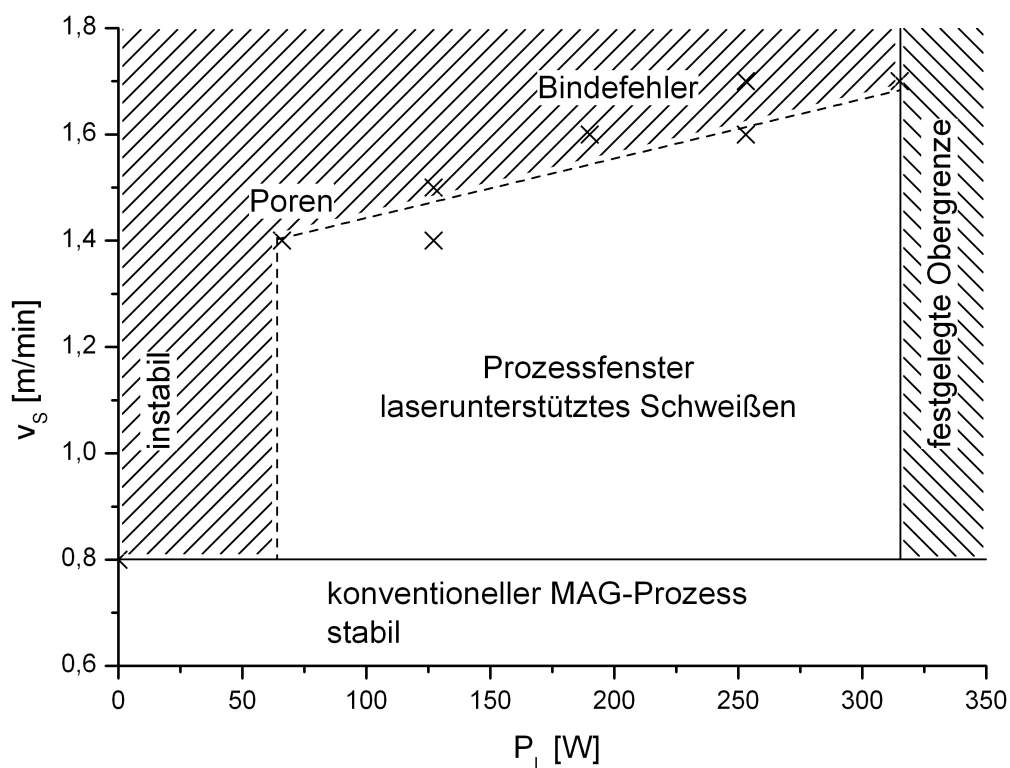


Abbildung 40: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserleistung für den Werkstoff HX340LAD Z100 (Überlappstoß). Parameter: $I = 135$ A; $U = 20,0$ V; $a = 0,2$ mm; $d_{\text{Spot}} = 300$ μm ; $s = 0,2$ mm.

6.1.2. Hochlegierter nichtrostender Stahl X2CrNi12+2B mit Baustahl S355J2G4C+N

Verfahrensgrenzen des konventionellen MAG-Schweißen

Überlappstoß

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_s	≤ 1,4 m/min	I	258 A	P_L	-
a	-	U	28,2 V	z_F	-
α	62 ° (PB)	v_D	12,5 m/min	d_{Spot}	-
s	-	Gas	22 l/min		

Tabelle 15: Parameter für die Überlappverbindung von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N

Als Basis für die laserunterstützten MAG-Versuche wurden für die Mischverbindung X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N die Verfahrensgrenzen für das konventionelle MAG-Schweißen ermittelt. Diese wurden am Überlappstoß in Position PB bestimmt.

Dabei liegt die Verfahrensgrenze bei $v_s = 1,4$ m/min mit einer Streckenenergie von $E = 0,31$ kJ/mm (Abbildung 41 und 43). Die Nahtbreite beträgt 8 mm und die Nahtüberhöhung 2,3 mm. Es liegt eine glatte, gleichmäßige und porenfreie Nahtoberfläche vor. Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten liegt keine homogene Schweißnaht mehr vor. Stattdessen verjüngt sich die Naht in regelmäßigen Abständen an der Nahtflanke, wodurch an diesen Stellen große Einbrandkerben entstehen (Abbildung 42).

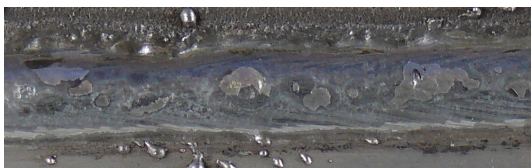


Abbildung 41: Überlappverbindung (#21) mit:
 $v_s = 1,4$ m/min,
 $I = 258$ A,
 $U = 28,2$ V,
 $E = 0,31$ kJ/mm



Abbildung 42: Überlappverbindung (#26) mit:
 $v_s = 1,7$ m/min,
 $I = 258$ A,
 $U = 28,2$ V

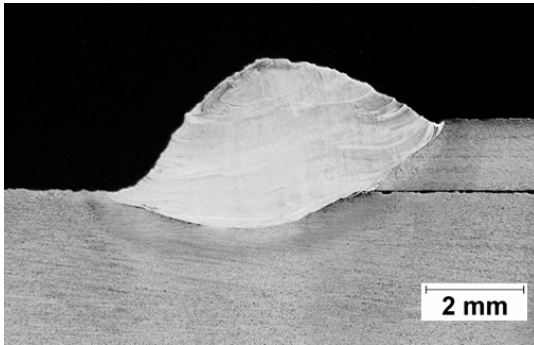


Abbildung 43: Querschliff einer Überlappverbindung (#23) mit:
 $v_s = 1,4 \text{ m/min}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 25,0 \text{ V}$,
 $E = 0,31 \text{ kJ/mm}$

Lasergeführtes MAG-Schweißen

Überlappstoß

Prozessparameter		MAG-Parameter		Laserparameter	
v_s	$\leq 2,0 \text{ m/min}$	I	258 A	P_L	315 W
a	0,2 – 5 mm	U	28,2 V	z_F	0 / +5,4 / +11,7 mm
α	62 ° (PB)	v_D	12,5 m/min	d_{Spot}	300 / 440 / 720 μm
s	-	Gas	22 l/min		

Tabelle 16: Parameter für die laserunterstützte Überlappverbindung von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N

Die laserunterstützten MAG-Versuche an der Mischverbindung X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N wurden mit den Parametern nach Tabelle 16 durchgeführt. Dabei wurde neben dem Abstand a auch die Fokusslage variiert, somit die Intensität verringert und der Spotdurchmesser vergrößert. Die Fokusslage wurde positiv, also von der Werkstückoberseite weg, defokussiert. Für die Versuche im Fokus konnte beobachtet werden, dass bei einem Abstand a gleich 2 bis 3 mm die besten Ergebnisse erzielt werden können. Für die Laserunterstützung in Fokusslage konnte mit $P_L = 315 \text{ W}$ bis $v_s = 1,8 \text{ m/min}$ geschweißt werden (Abbildung 44, 46). Die Nahtoberfläche ist glatt und porenfrei, die Nahtflanke am Oberblech weist eine Einbrandkerbe auf. Die Nahtbreite ist mit 6 mm 2 mm kleiner wie beim konventionellen MAG-Prozess. Die Nahtüberhöhung beträgt 2,3 mm. Bei $v_s = 1,9 \text{ m/min}$ reicht die Unterstützung durch einen 315 W Laserstrahl mit 300 μm Spot nicht mehr aus (Abbildung 45). Es liegt das in Abbildung 45 dargestellte Versagensbild vor. Die Naht weist in regelmäßigen

Abständen, aufgrund fehlenden Schweißgutes, größere nicht mit Schmelze bedeckte Bereiche auf.



Abbildung 44: Überlappverbindung (#47) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 24,1 \text{ V}$,
 $E = 0,22 \text{ kJ/mm}$



Abbildung 45: Überlappverbindung (#31) mit:
 $v_s = 1,9 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 28,2 \text{ V}$

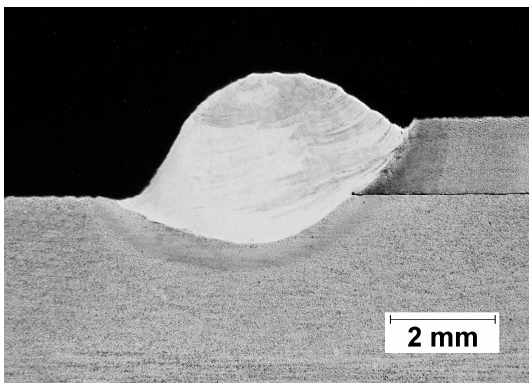


Abbildung 46: Querschliff einer Überlappverbindung (#47) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 24,1 \text{ V}$,
 $E = 0,22 \text{ kJ/mm}$

Bei einer Defokussierung von $z_F = +5,4 \text{ mm}$ kann die maximale Schweißgeschwindigkeit v_s um weitere $0,2 \text{ m/min}$ auf $v_s = 2,0 \text{ m/min}$ gesteigert werden (Abbildung 47). Mit stärkerer Defokussierung wird keine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit erreicht. Es liegt ein glattes, homogenes und porenfreies Nahtaussehen vor. Die Nahtflanke am Unterblech weist eine leichte und die am Oberblech eine stärkere Einbrandkerbe auf. Die Nahtbreite beträgt $6,4 \text{ mm}$ bei einer Nahtüberhöhung von $2,6 \text{ mm}$.

Im Vergleich zum konventionellen MAG-Schweißen konnte die maximale Schweißgeschwindigkeit von $v_s = 1,4 \text{ m/min}$ auf $v_s = 2,0 \text{ m/min}$ gesteigert werden. Das entspricht einer Erhöhung um 42% ($\Delta v_s = 0,7 \text{ m/min}$). Die Streckenenergie für den konventionellen MAG-Prozess beträgt $E = 0,31 \text{ kJ/mm}$, die für den laserunterstützten MAG-Prozess bei $v_s = 2,0 \text{ m/min}$ ist $E = 0,23 \text{ kJ/mm}$. Eine Reduzierung um 26% ($\Delta E = 0,08 \text{ kJ/mm}$).

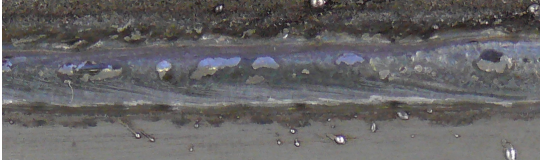


Abbildung 47: Überlappverbindung (#38) mit:
 $v_s = 2,0 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $d_{\text{Spot}} = 440 \text{ }\mu\text{m}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 28,2 \text{ V}$,
 $E = 0,23 \text{ kJ/mm}$

Wie man in Abbildung 46 erkennen kann, wird bei den höheren Vorschubgeschwindigkeiten das Nahtvolumen nicht mehr vollständig aufgefüllt und es entstehen, durch ein Volumendefizit in Form von Einbrandkerben, geometrische Kerben. Aufgrund der schmalen Wärmeeinflusszone bei der laserunterstützten MAG-Naht ($\approx 6,5 \text{ mm}$) liegt hier ein größerer Härtegradient als beim konventionellen Schweißen ($\approx 8 \text{ mm}$) vor. Dadurch ist die metallurgische Kerbe größer. Den Einfluss des größeren Härtegradienten auf die Gebrauchstauglichkeit der Naht muss in weiteren Versuchen näher untersucht werden.

6.2. Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität

Das lasergeführte MAG-Schweißen hat aufgrund seiner Vielzahl von Einstellparametern viele Einflussgrößen auf die Prozessstabilität. Dabei spielen die Laserleistung, die Fokusslage z_F (bzw. der Spotdurchmesser d_{spot}), der Abstand a , die Schutzgasabdeckung, der Stromkontaktrohr Abstand und bei dem verzinkten Werkstoff auch der Spalt s eine maßgebliche Rolle.

Abstand a

Bei den untersuchten Anwendungen ist der Einfluss des Abstandes a unterschiedlich. Dies kann zum einen an dem Einsatz der unterschiedlichen Werkstoffe liegen, zum anderen an der Verwendung der unterschiedlichen Lichtbogenbereiche. Für $a = 0$ mm trifft der Laserstrahl mitunter direkt auf den Draht und nicht in das Schmelzbad. Hierbei hat sich ergeben das dadurch der MAG-Prozess nicht konsequent unterstützt wird und instabil ist, weshalb der Abstand a immer etwas größer wie 0 mm sein muss.

In Abbildung 48 ist näherungsweise das Prozessfenster der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes a für die Mischverbindung von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N dargestellt. Der optimale Abstand liegt zwischen $a = 1$ mm und $a = 4$ mm. Bei größer werdendem Abstand lässt der Einfluss nach und das Schmelzbad bindet lokal nicht mehr an. Wie in Abbildung 49 ersichtlich wird das Nahtprofil in Schweißrichtung bei kleinerem a als 2 mm wellig und teilweise verjüngt es sich an den Wellentälern (Abbildung 50), wie es auch beim Schweißen ohne Laserunterstützung auftritt.

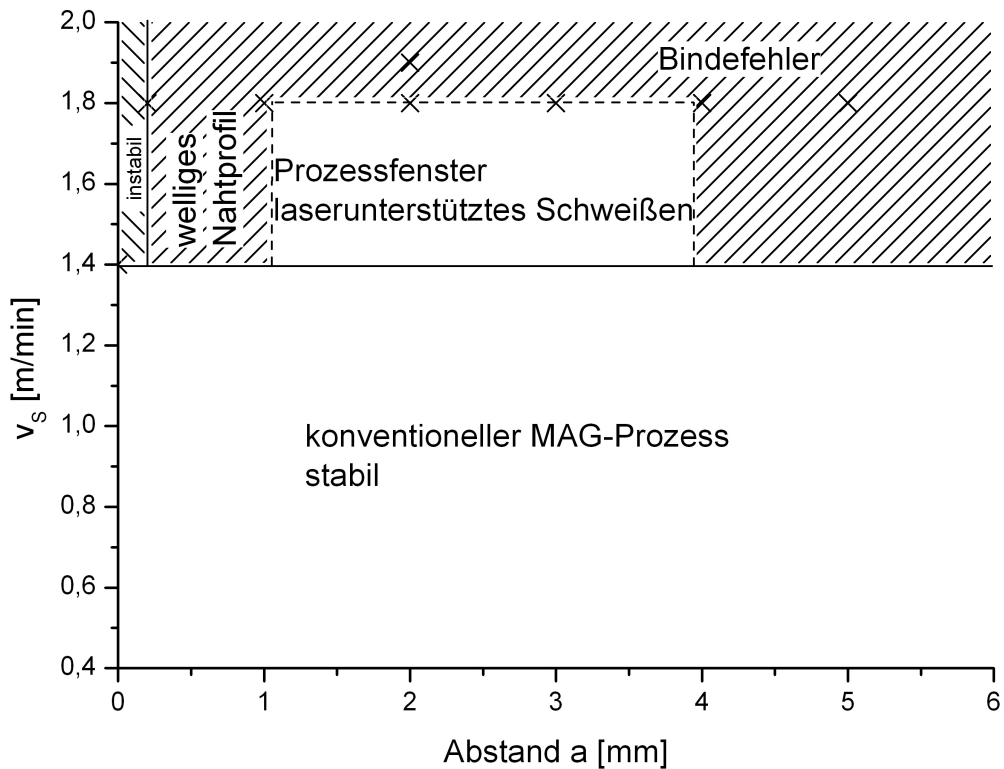


Abbildung 48: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes a für die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N (Überlappstoß). Parameter: $I = 258$ A; $U = 28,2$ V; $P_L = 315$ W; $d_{\text{Spot}} = 300$ μm .

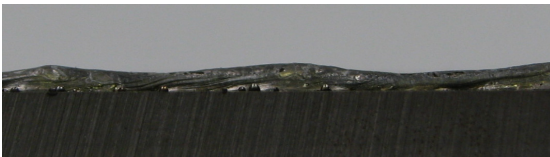


Abbildung 49: Seitenansicht einer Überlappverbindung (#29) mit:
 $v_s = 1,8$ m/min,
 $a = 0,2$ mm,
 $P_L = 315$ W,
 $I = 258$ A,
 $U = 28,2$ V



Abbildung 50: Überlappverbindung (#36) mit:
 $v_s = 1,8$ m/min,
 $a = 0,2$ mm,
 $P_L = 315$ W,
 $I = 258$ A,
 $U = 28,2$ V

In Abbildung 51 ist der Einfluss des Abstandes a auf die Schweißgeschwindigkeit dargestellt. Wie bereits erwähnt, ist der Bereich von $a = 0$ bis $a = 0,2$ mm instabil. Der anschließende Bereich von $a = 0,2$ mm bis $a = 3$ mm ist bis $v_s = 1,6$ m/min für den HX340LAD Z100 durch einen stabilen laserunterstützten Prozess gekennzeichnet (Abbildung 37, 39). Bei größerem a wird die Schweißnaht großporig (Abbildung 52). Ab $a = 4$ mm, sowie bei höheren Schweißgeschwindigkeiten, treten Bindefehler an den Nahtflanken auf (Abbildung 53). Die eingezeichneten Grenzen in Abbildung 51 sind ebenfalls näherungsweise abgebildet.

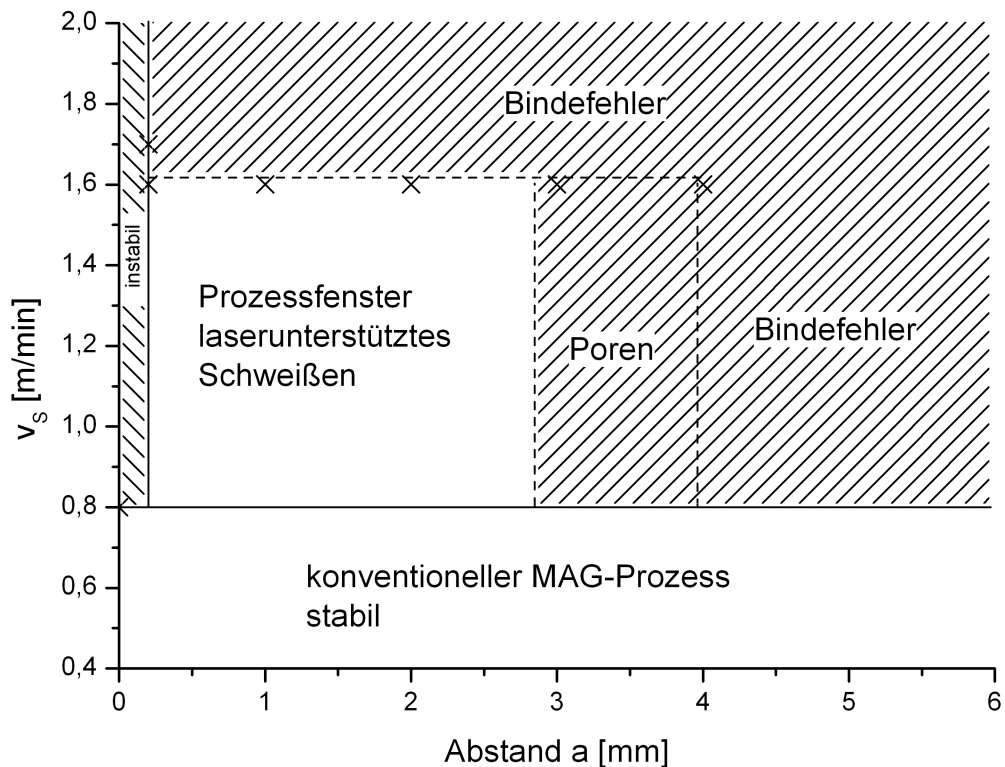


Abbildung 51: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes a für den Werkstoff HX340LAD Z100 (Überlappstoß). Parameter: $I = 135$ A; $U = 20,0$ V; $P_L = 253$ W; $d_{\text{spot}} = 300$ μm ; $s = 0,2$ mm.



Abbildung 52: Überlappverbindung (#130) mit: $v_s = 1,6$ m/min, $a = 3$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V



Abbildung 53: Überlappverbindung (#131) mit: $v_s = 1,6$ m/min, $a = 4$ mm, $P_L = 253$ W, $I = 135$ A, $U = 20,0$ V

Spannung U

Für die Werkstoffkombination von X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N liegt bei einer Spannung bis $U = 28,2$ V ein gutes Schweißnahtergebnis vor. Höhere Spannungen füllen das Schmelzgut in regelmäßigen Abständen nicht auf. In diesen Bereichen entsteht eine kleine Naht mit breiter Einbrandzone. Bei $U = 30,2$ V ist dies in Ansätzen zu erkennen, bei $U = 32,3$ V dagegen sehr stark ausgeprägt (Abbildung 54, 55). Für kleinere Spannungen als $U = 28,2$ V tritt die Verjüngung der Schweißnaht in regelmäßigen Abständen nicht auf. Sie behält ihren konstanten Nahtquerschnitt über die gesamte Nahtlänge.



Abbildung 54: Überlappverbindung (#44) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 30,2 \text{ V}$



Abbildung 55: Überlappverbindung (#45) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 32,3 \text{ V}$

Stromkontaktrahabstand

Durch den Stromkontaktrahabstand wird ebenfalls das Schweißnahtaussehen beeinflusst. Bei einem eingestellten Stromkontaktrahabstand von 12,5 mm ist das Nahtaussehen durch eine stärkere Nahtüberhöhung von 1,4 mm geprägt (Abbildung 56). Bei eingestellten 15 mm sind die Nahtflanken sauberer angeschmolzen und die Schweißnaht weist eine um 0,4 mm geringe Nahtüberhöhung auf (Abbildung 57). Wie in Abbildung 58 erkennbar ist, liegt bei einem Abstand von 19 mm keine ausreichende Schweißnahtqualität mehr vor. Es entsteht eine unregelmäßige und porige Naht, deren Nahtflanken nicht komplett angeschmolzen sind.



Abbildung 56: Seiten- und Draufsicht einer Überlappverbindung (#401) mit:
Werkstück = HX340LAD Z100,
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
Stromkontaktrahabstand = 12,5 mm

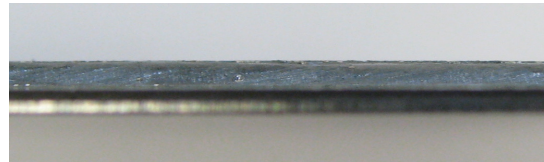


Abbildung 57: Seiten- und Draufsicht einer Überlappverbindung (#405) mit:
Werkstück = HX340LAD Z100,
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
Stromkontaktrahabstand = 15 mm



Abbildung 58: Überlappverbindung (#403) mit:
Werkstück = HX340LAD Z100,
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
Stromkontaktrahabstand = 19 mm

Gasabdeckung

Die Gasabdeckung hat einen enormen Einfluss auf die Nahtqualität. Für die Versuche wurden Schutzgasdüsen mit verschiedenen Aussparungsgrößen eingesetzt. Durch die Aussparung kann der Abstand des Lichtbogenfußpunktes zum Laserstrahlfußpunkt klein gehalten werden. In Abbildung 20 sind die verwendeten Düsen dargestellt. Die Düse mit der großen Aussparung, in der Abbildung links dargestellt, führt zu einer unzureichenden Schweißnahtqualität (Abbildung 60). Mit der kleineren Aussparung in der Düse, in der Mitte der Abbildung dargestellt, lässt sich eine ausreichende Schutzgasabdeckung gewährleisten (Abbildung 61). Bei einer Schutzgasdüse ohne Aussparung entsteht entweder ein großer Abstand a oder der Brenner muss entsprechend flach zur Werkstückoberfläche angeordnet werden, um den Abstand a klein zu halten und eine Kollision zwischen Brenner und Laserstrahl zu verhindern (Abbildung 59).

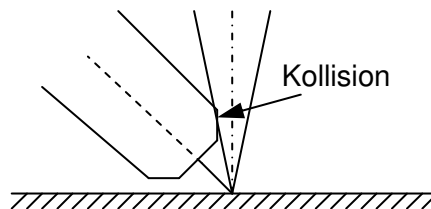


Abbildung 59: Darstellung der Kollision zwischen Brenner und Laserstrahl bei zu kleinem Abstand a



Abbildung 60: Auftragsnaht mit:
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 Schutzgasdüse mit großer Aussparung



Abbildung 61: Auftragsnaht mit:
 $v_s = 0,8 \text{ m/min}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$,
 Schutzgasdüse mit kleiner Aussparung

Winkel α

Der Prozess wird auch von dem Winkel zwischen Laserstrahl + Brenner und Werkstückoberfläche beeinflusst. Dabei wurden die Versuche für die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N erfolgreich mit einem Winkel von $\alpha = 62^\circ$ geschweißt. Bei weiteren Versuchen mit $\alpha = 58^\circ$ bzw. $\alpha = 70^\circ$ konnte keine ausreichende Schweißnahtqualität erzielt werden.

Spotdurchmesser

Wie die Versuche mit einem defokussierten Arbeitspunkt an der Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N gezeigt haben, hat die Fokusslage einen großen Einfluss auf die Lichtbogenstabilität. Dabei wurde bei den durchgeführten Versuchen die Fokusslage ins Positive verschoben, um mit dem Laserstrahl nicht die Gasdüse des Brenners anzuschmelzen. In Abbildung 62 ist näherungsweise das Prozessfenster der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Spotdurchmessers dargestellt. Aufgrund des verwendeten Fokussierspiegels mit einer Brennweite von $f = 300 \text{ mm}$ war der Fokussdurchmesser $d_{\text{Fokus}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$. Bei einem Spotdurchmesser von $d_{\text{Spot}} = 440 \text{ }\mu\text{m}$ wurde das beste Ergebnis erzielt. Bei dieser Fokusslage vergrößerte sich der Spotdurchmesser um 46,7 % und die Leistungsdichte sank von $445,6 \text{ kW/cm}^2$ auf $207,2 \text{ kW/cm}^2$. Für einen Spotdurchmesser von $d_{\text{Spot}} = 720 \text{ }\mu\text{m}$ konnte keine gleichwertige Prozessbeeinflussung wie für $d_{\text{Spot}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$ oder $d_{\text{Spot}} = 440 \text{ }\mu\text{m}$ beobachtet werden. Die Leistungsdichte für $d_{\text{Spot}} = 720 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt $E_L = 77,4 \text{ kW/cm}^2$. Eine optimale Prozessunterstützung hängt somit nicht primär von der Leistungsdichte, sondern auch von der Größe der durch den Laserstrahl beeinflussten Fläche ab. Weiterhin wird eine Mindestleistungsdichte für die Prozessstabilisierung benötigt.

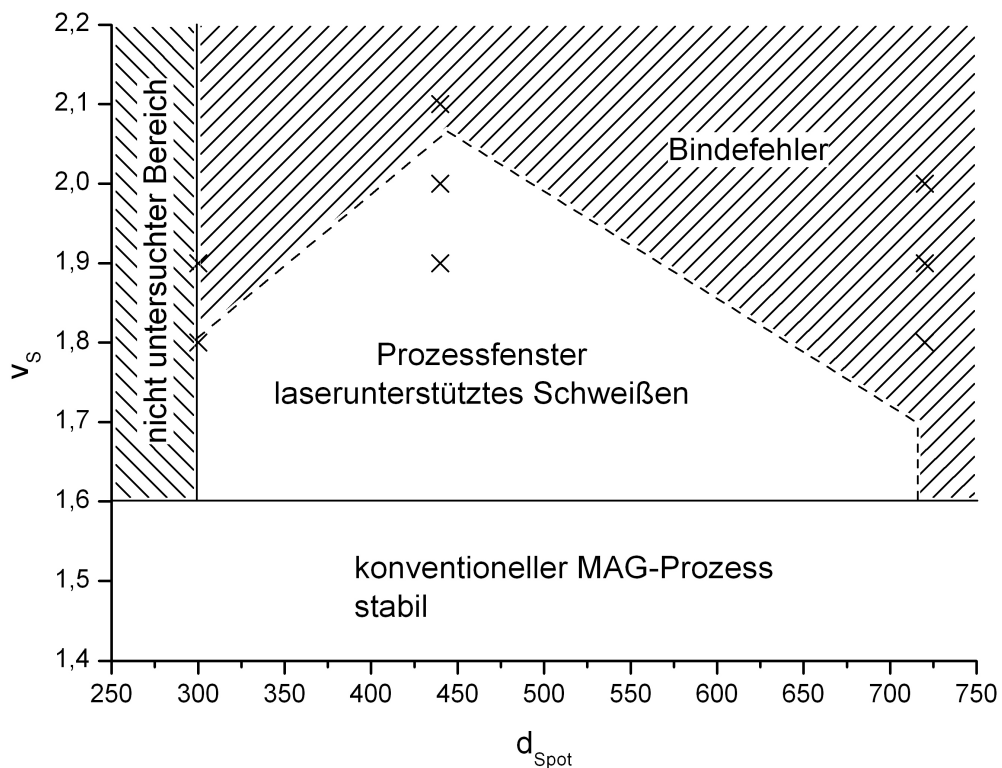


Abbildung 62: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Spotdurchmessers für die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N (Überlappstoß). Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $P_L = 315 \text{ W}$; $a = 2 \text{ mm}$; $d_{\text{Spot}} = 300 \text{ }\mu\text{m}$.

6.3. Einfluss des Laserstrahls auf Lichtbogenlenkung und –verhalten

Für die seitliche Auslenkung der Schweißnaht wird bedeutend mehr Laserleistung wie für die Stabilisierung benötigt. Untersucht wurde eine Auftragsnaht im Kurzlichtbogenbereich mit $I = 135\text{ A}$ und $U = 20,0\text{ V}$ auf 8 mm dickem Blech aus S355J2G4C+N. Dabei wurde der Laserstrahlfußpunkt im Abstand $b = 1\text{ mm}$ und 2 mm orthogonal zur Schweißrichtung positioniert. Bei $b = 1\text{ mm}$ ist für eine seitlich Auslenkung der Naht von 1 mm 800 W Laserleistung notwendig, mit 600 W lässt sich das Schmelzbad nicht auslenken (Abbildung 63 und 64). Für $b = 2\text{ mm}$ ist eine Auslenkung von 1,5 mm mit 1000 W möglich (Abbildung 65). Bei 800 W erfolgt eine kaum sichtbare Auslenkung (Abbildung 66).

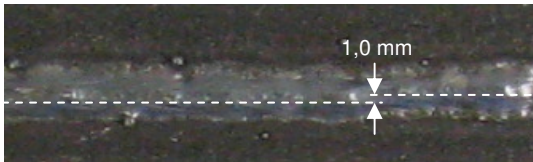


Abbildung 63: Auftragsnaht mit:
Werkstück = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1\text{ m/min}$,
 $b = 1\text{ mm}$,
 $P_L = 800\text{ W}$,
 $I = 135\text{ A}$,
 $U = 20,0\text{ V}$



Abbildung 64: Auftragsnaht mit:
Werkstück = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1\text{ m/min}$,
 $b = 1\text{ mm}$,
 $P_L = 600\text{ W}$,
 $I = 135\text{ A}$,
 $U = 20,0\text{ V}$

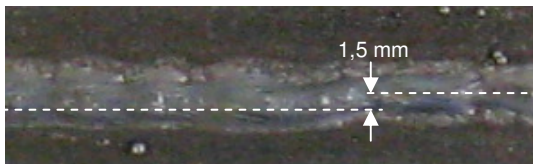


Abbildung 65: Auftragsnaht mit:
Werkstück = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1\text{ m/min}$,
 $b = 2\text{ mm}$,
 $P_L = 1000\text{ W}$,
 $I = 135\text{ A}$,
 $U = 20,0\text{ V}$

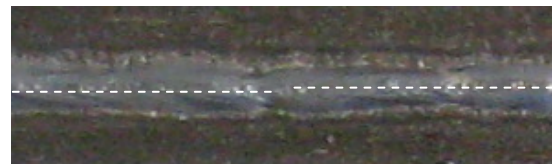


Abbildung 66: Auftragsnaht mit:
Werkstück = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1\text{ m/min}$,
 $b = 2\text{ mm}$,
 $P_L = 800\text{ W}$,
 $I = 135\text{ A}$,
 $U = 20,0\text{ V}$

Die Auslenkung der Naht beruht nicht auf der Auslenkung des Lichtbogens, sondern auf der thermischen Wirkung des Laserstrahls. Wie die Bilderfolge in Abbildung 67 und 68 zeigt, wird die Leuchterscheinung des Lichtbogens, in dem sich der Großteil der angeregten Atome befindet, nicht von dem Laserstrahl oder dessen Plasma beeinflusst. Er brennt symmetrisch unterhalb der Elektrode (Abbildung 68, ms 1 - 17) und auf dem kürzesten Weg zum Werkstück (Abbildung 68, ms 25). Ein Anziehen des Lichtbogenfußpunktes durch das Keyhole des Lasers ist nicht zu erkennen. Anhand der Momentaufnahmen ist auch kein Einschnüren der Leuchterscheinung des Lichtbogens zu erkennen. Der 2 mm seitlich laufende Laserstrahl schmilzt die

Werkstückoberfläche auf, wodurch sich das Schmelzbad auf dieser Seite verbreitert. Der sich ablösende Tropfen des Zusatzwerkstoffes läuft beim Eintauchen in das Schmelzbad zu der Seite hin, auf der sich die Laserstrahlnaht befindet (Abbildung 68, ms 0 und 30). In Abbildung 67 ms 0 und 30 ist zu erkennen das ohne Laserunterstützung der Tropfen des Zusatzwerkstoff direkt in das Schmelzbad abgelöst wird.

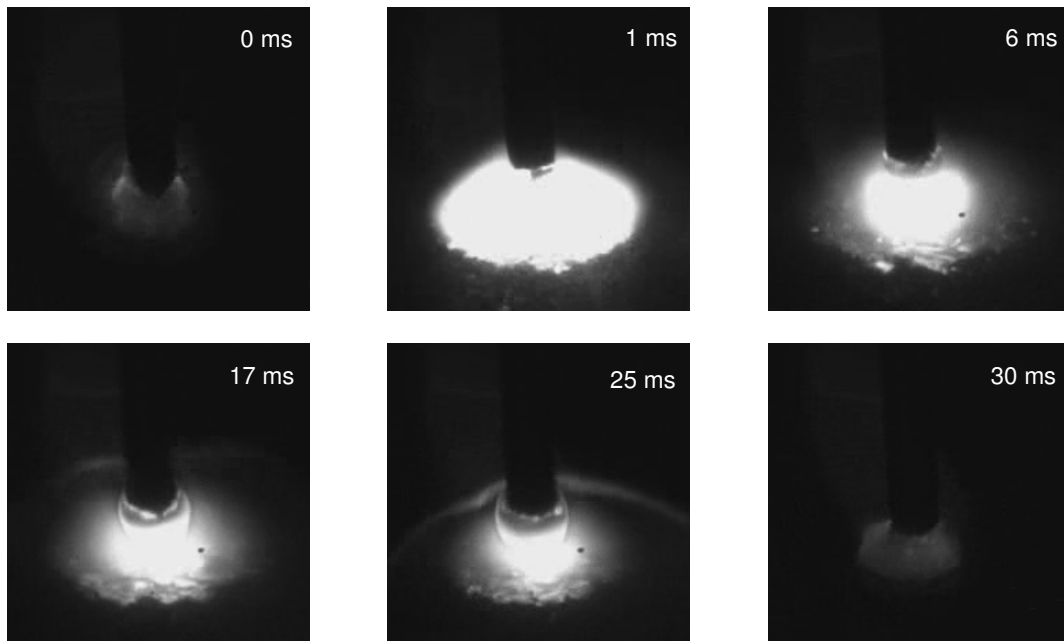


Abbildung 67: Lichtbogenverhalten beim konventionellen MSG-Schweißen.
Werkstoff = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1 \text{ m/min},$
 $I = 135 \text{ A},$
 $U = 20,0 \text{ V}$

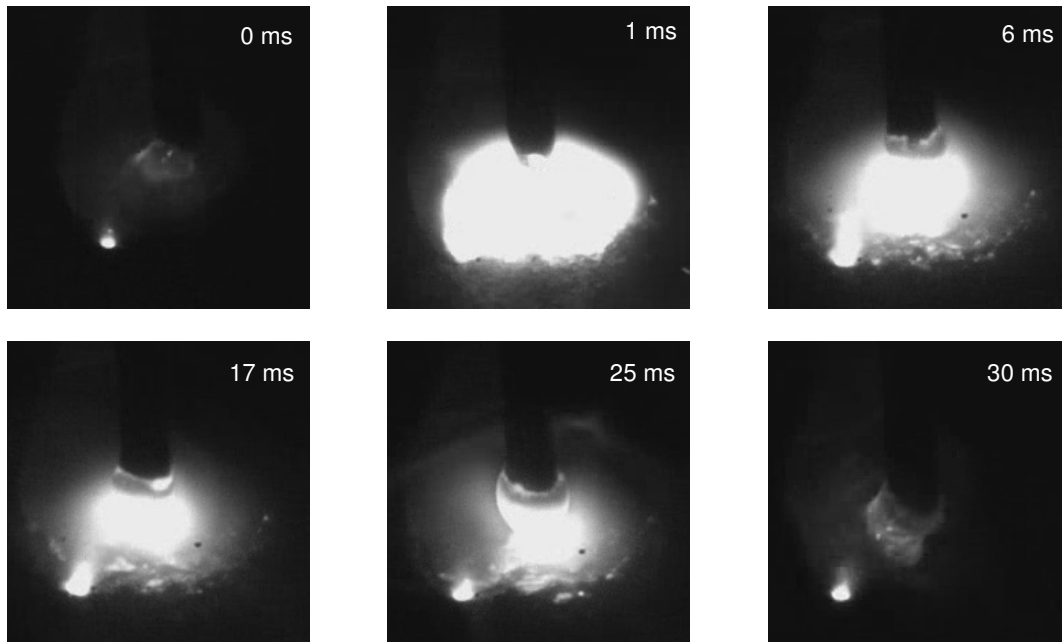


Abbildung 68: Lichtbogenverhalten beim laserunterstützten MSG-Schweißen.
Werkstoff = S355J2G4C+N,
 $v_s = 2,1 \text{ m/min}$,
 $b = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 1000 \text{ W}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$

Eine, durch den Lasereinfluss bewirkte, Stabilisierung des MAG-Prozesses lässt sich messtechnisch anhand des aufgezeichneten Stromverlaufes nachweisen. Abbildung 69 zeigt einen konventionellen MAG-Prozess eines Überlappstoßes der Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N bei $a = 2 \text{ mm}$. Der Mittelwert der aufgezeichneten Stromwerte beträgt 261 A . In Abbildung 70 ist derselbe Schweißprozess mit zusätzlich 315 W Laserleistung dargestellt. Durch den Lasereinfluss auf den MAG-Prozess ist eine Reduzierung des Schweißstromes um 20 A auf 241 A zu erkennen. Neben der Reduzierung des mittleren Schweißstromes nehmen auch die Schwankungen in der Stromstärke ab. Für den konventionellen Schweißprozess liegen sie bei ca. 40 A . Die Schwankungen des laserunterstützten Prozesses liegen bei ca. 30 A . In beiden Fällen beträgt die mittlere Schweißspannung $30,6 \text{ V}$. Somit ergibt sich für den konventionellen MAG-Prozess eine Gesamtleistung von 7986 W und für den laserunterstützten Prozess 7689 W . Für den laserunterstützten Prozess stellt sich eine um 297 W geringere Gesamtleistung ein. Es findet aufgrund der Laserunterstützung eine Stabilisierung des Gesamtprozesses statt. Dadurch ist weniger Leistung erforderlich, um das Lichtbogenplasma zu ionisieren und den Zusatzwerkstoff abzuschmelzen. Zusätzlich kann durch die Laserunterstützung des MAG-Prozesses im Kurzlichtbogen eine Erhöhung der Kurzschlussfrequenz

festgestellt werden. Aufgrund der höheren Frequenz entsteht ein feinschuppigeres und gleichmäßigeres Nahtaussehen.

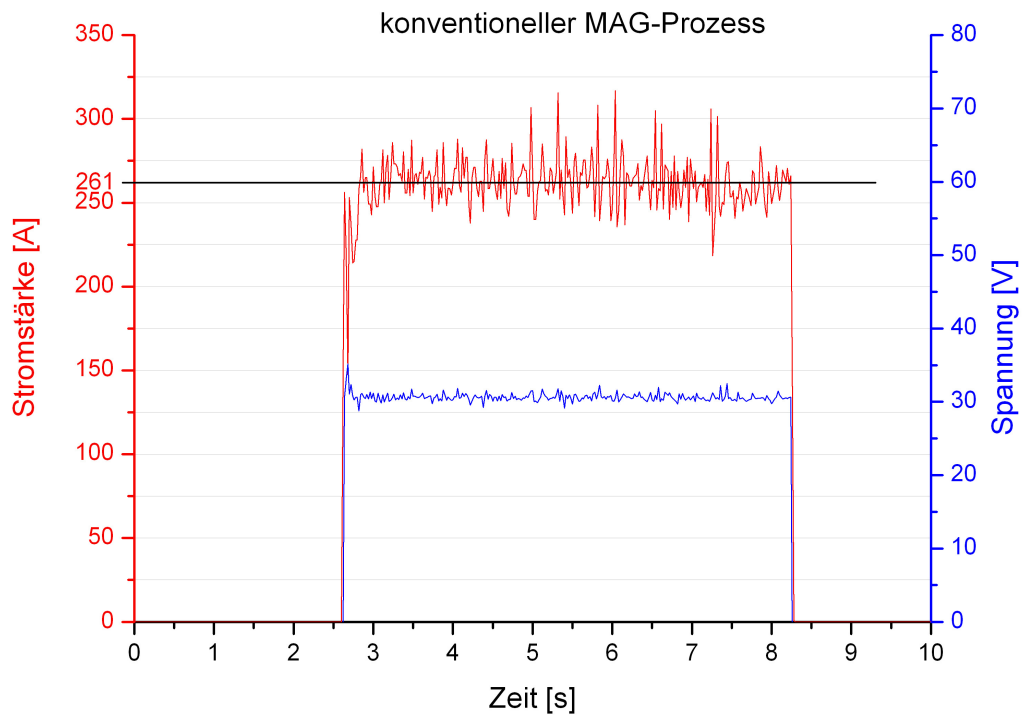


Abbildung 69: Stromverlauf des konventionellen MAG-Prozesses. Eingestellte Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $v_s = 1,7 \text{ m/min}$

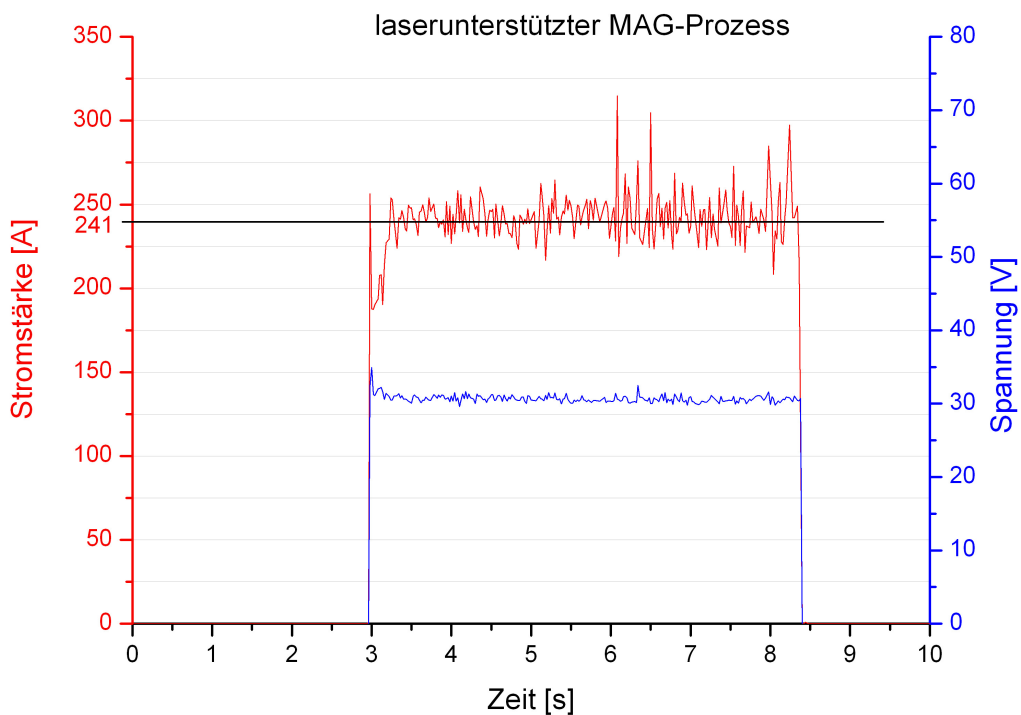


Abbildung 70: Stromverlauf des laserunterstützten MAG-Prozesses mit 315 W Laserleistung. Eingestellte Parameter: $I = 258 \text{ A}$; $U = 28,2 \text{ V}$; $P_L = 315 \text{ W}$; $v_s = 1,7 \text{ m/min}$

7. Diskussion der Versuchsergebnisse

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren, die durch die Kopplung des MSG-Prozesses mit dem Laserstrahl entstehen, gibt es ein enges Prozessfenster, in dem gearbeitet werden kann. Dabei müssen alle Einflussfaktoren genau aufeinander abgestimmt sein. Die im Kapitel 6.2. genannten Faktoren beeinflussen den Prozess erheblich. Bei optimal eingestellten Parametern lässt sich, wie in Abbildung 71 und 72 ersichtlich, die Schweißgeschwindigkeit deutlich steigern. Durch Defokussierung des Laserstrahls bei der Mischverbindung X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N kann die Schweißgeschwindigkeit weiter erhöht werden. Für den HX340LAD Z100 muss der Einfluss der Fokusslage noch untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit war dies nicht möglich.

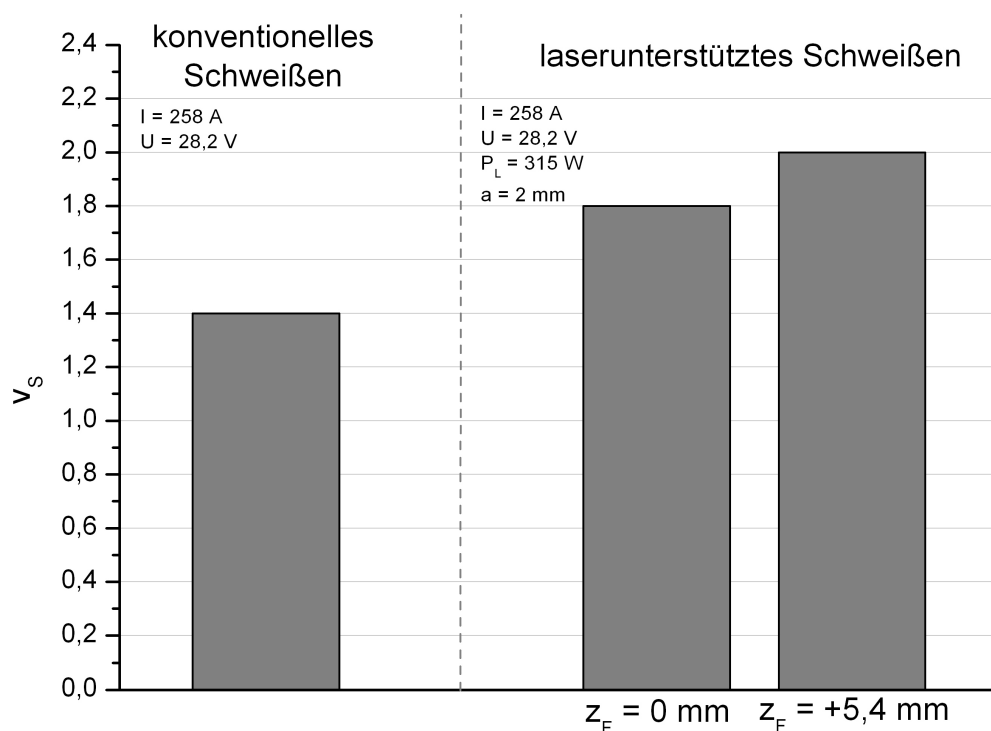


Abbildung 71: Vergleich der Schweißgeschwindigkeiten zwischen konventionellen Schweißen und lasergeführten Schweißen der Mischverbindung X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N im Überlappstoß

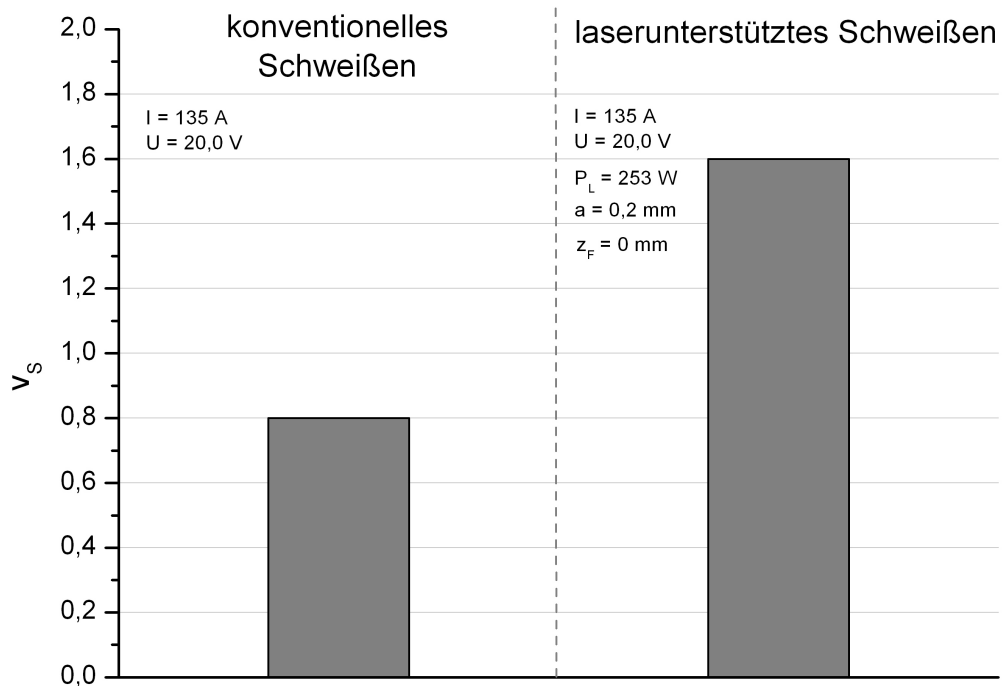


Abbildung 72: Vergleich der Schweißgeschwindigkeiten zwischen konventionellen Schweißen und lasergeführten Schweißen von HX340LAD Z100 im Überlappstoß

Das enge Prozessfenster stellt erhöhte Anforderungen, um die Reproduzierbarkeit des Prozesses zu gewährleisten. Um eine zuverlässige Prozessstabilisierung sicherzustellen, müssen die einzelnen Parameter genau aufeinander abgestimmt sein. So können Spritzer auf dem Fokussierspiegel, unzureichende Schutzgasabdeckung oder eine falsch eingestellte Brennerposition den Prozess derartig beeinflussen, dass die Prozessstabilisierung nicht oder nur unzureichend gewährleistet ist.

Wie am Beispiel des verzinkten Feinkornbleches zu sehen ist, kann bei nahezu gleichbleibender Nahtgeometrie zwischen konventionellen und laserunterstützten Schweißen, die Schweißgeschwindigkeit um 100 % gesteigert werden. Für die Mischverbindung kann die Geschwindigkeit um 42 % erhöht werden. Wodurch die Wärmeeinbringung und der dadurch verursachte Verzug erheblich reduziert sind.

In Abbildung 73 ist die eingebrachte Streckenenergie des laserunterstützten und konventionellen MAG-Prozesses für den Werkstoff HX340LAD Z100 und die Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N im Überlappstoß unter Betrachtung der Schweißgeschwindigkeit gegenübergestellt.

Für den HX340LAD Z100 kann die Streckenenergie von 0,20 kJ/mm um 45 % auf 0,11 kJ/mm reduziert werden. Dabei werden durch den Laserstrahl 0,01 kJ/mm eingebracht. Das entspricht 9 % der gesamten Streckenenergie. Aufgrund der

9-prozentigen Erhöhung der Energieeinbringung auf das Bauteil kann die Schweißgeschwindigkeit um 100 % gesteigert werden. Bei der Werkstoffkombination X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N reduziert sich die Streckenenergie um 26 % von 0,31 kJ/mm auf 0,23 kJ/mm. Durch den Laserstrahl werden ebenfalls 0,01 kJ/mm eingebracht. Dies entspricht einem Anteil von 4 % der gesamten Streckenenergie wodurch die Schweißgeschwindigkeit um 30 % gesteigert werden kann.

In beiden Fällen führte die zusätzlich eingebrachte Leistung durch den Laserstrahl, zur Steigerung der Schweißgeschwindigkeit plus zusätzlichen Gewinn.

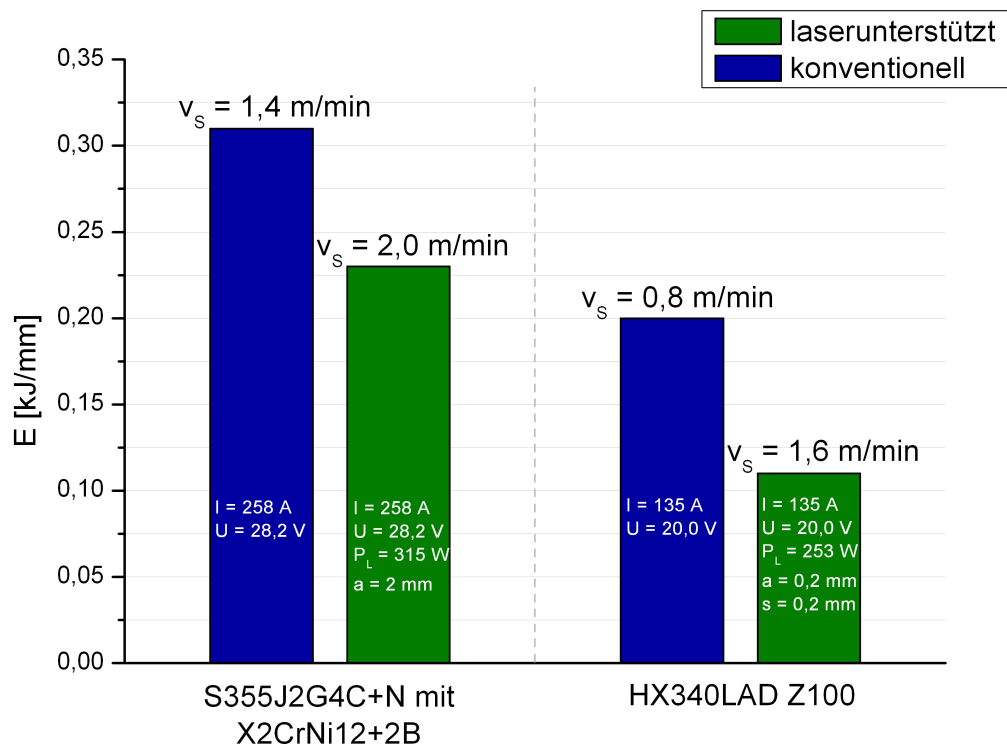


Abbildung 73: Vergleich der Streckenenergie zwischen konventionellem und laserunterstützten Schweißen am Überlappstoß des Werkstoffes HX340LAD Z100 und der Werkstoffkombination S355J2G4C+N mit X2CrNi12+2B.

Für die Anwendungen der untersuchten Mischverbindung stellt die Entstehung von Einbrandkerben eine Prozessgrenze dar. Anhand DIN EN ISO 5817 sind Einbrandkerben für die Bewertungsgruppe B nicht zulässig. Für die Bewertungsgruppe C darf die Einbrandkerbe nicht größer als $h \leq 0,1 \cdot t$ sein und für die Bewertungsgruppe D nicht größer als $h \leq 0,2 \cdot t$. Die Einbrandkerben der untersuchten Proben liegen zwischen $h = 0,2$ mm und $h = 0,5$ mm. Somit sind nach DIN EN ISO 5817 die Grenzwerte für die Bewertungsgruppe C ($h \leq 0,15$ mm) nicht erfüllt und in Einzelfällen auch die der Bewertungsgruppe D nicht ($h \leq 0,3$ mm), Abbildung 74, 75.

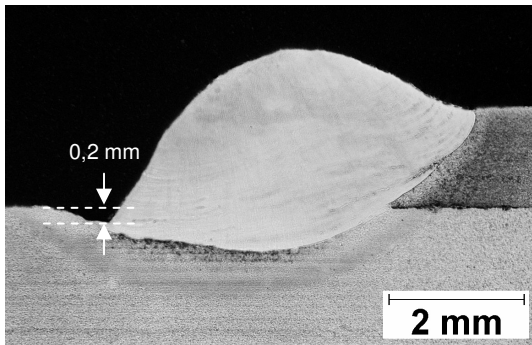


Abbildung 74: Überlappverbindung (#37) mit:
 $v_s = 1,9 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $d_{\text{Spot}} = 440 \text{ µm}$,
 $P_L = 315 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 28,2 \text{ V}$

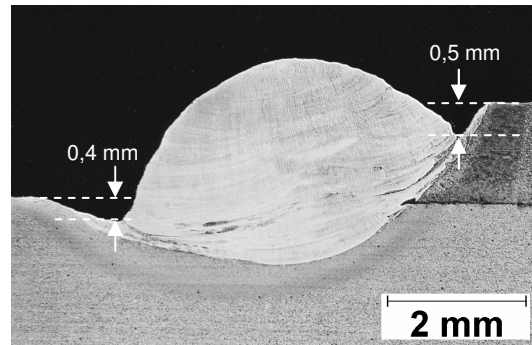


Abbildung 75: Überlappverbindung (#29) mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 253 \text{ W}$,
 $I = 258 \text{ A}$,
 $U = 28,2 \text{ V}$

Die erzielten Nahtqualitäten können nicht durch einen MAG-Prozess mit ähnlichem Leistungseinsatz erreicht werden. Verglichen wurde an einer Auftragsnaht am Beispiel des HX340LAD Z100 zwischen einem konventionellen MAG-Prozess mit $I = 160 \text{ A}$ und $U = 22,1 \text{ V}$ ($P_{\text{Ges}} = 3,5 \text{ kW}$) und einem laserunterstützten MAG-Prozess mit $I = 135 \text{ A}$, $U = 20,0 \text{ V}$ und $P_L = 600 \text{ W}$ ($P_{\text{Ges}} = 3,3 \text{ kW}$). Die Naht des konventionellen MAG-Prozesses ist, bei etwa gleicher Nahtüberhöhung (1 mm) breiter. Die Wärmeeinbringung bei dem konventionellen Prozess ist großflächiger, wodurch wurzelseitig das Zink komplett auf einem 3,5 mm breitem Streifen verbrennt (Abbildung 77 oben). Bei dem laserunterstützten Prozess hingegen verbrennt das Zink nicht komplett (Abbildung 76 oben). Die Nahtoberfläche der laserunterstützten Naht ist deutlich homogener und feinschuppiger wie die der konventionellen Naht. Die Nahtflanken sind gleichmäßiger angeschmolzen.

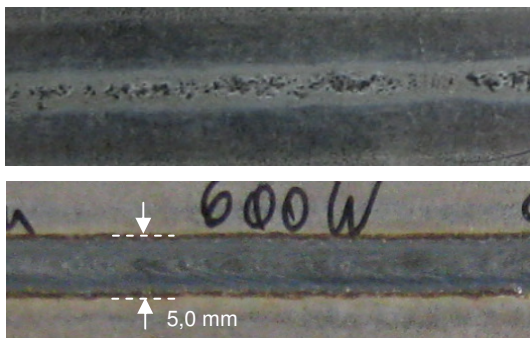


Abbildung 76: Wurzel- und Decklagenansicht einer Auftragsnaht mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $a = 2 \text{ mm}$,
 $P_L = 600 \text{ W}$,
 $I = 135 \text{ A}$,
 $U = 20,0 \text{ V}$

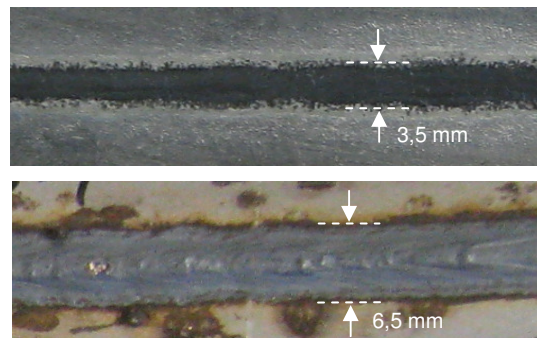


Abbildung 77: Wurzel- und Decklagenansicht einer Auftragsnaht mit:
 $v_s = 1,8 \text{ m/min}$,
 $I = 160 \text{ A}$,
 $U = 22,1 \text{ V}$

Durch die Resultate der Versuche konnte eine Interaktion zwischen Laserstrahl und Lichtbogen nachgewiesen werden. Durch den Einsatz eines CO₂-Lasers konnte der konventionelle MAG-Prozess stabilisiert werden, wodurch eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit erreicht wurde. Anhand des Vergleiches zwischen laserunterstütztem und konventionellem Schweißen bei gleichem Leistungseinsatz konnte gezeigt werden, dass durch den zusätzlichen Laserstrahlprozess eine konzentriertere Wärmeeinbringung stattfindet. Dadurch werden weniger Legierungselemente bzw. weniger der Oberflächenbeschichtung verbrennen. Die Schweißnaht des laserunterstützten Schweißprozesses hat bei sonst gleichen Bedingungen eine feinschuppigere und schmalere Nahtoberfläche. Eine Auslenkung der Schweißnaht konnte in gewissen Grenzen ebenfalls nachgewiesen werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Einsetzbarkeit des laserunterstützten MAG-Schweißens auf industrielle Anwendungen untersucht. Die verwendeten Fügestellen stammen aus den Bereichen des Automobil- und Schienenfahrzeugbaus. Untersuchungen der Prozessoptimierung fanden lediglich hinsichtlich der Prozessstabilität statt. Die Nahtoptimierung wurde dabei nicht betrachtet. Am Beispiel des Automobilbaus wurde ein 1,5 mm dickes verzinktes höherfestes Blech, der HX340LAD Z100, im Überlappstoß verschweißt. Durch den Einsatz höherfesterer Materialien werden Nähte mit größerer Nahtfläche nötig, um die im Crash auftretenden Kräfte aufnehmen zu können. Daher lösen MAG-Nähte bisherige Punktschweißungen ab. Durch den Einsatz des lasergeführten MAG-Schweißens können längere Nähte mit geringeren Verzug geschweißt werden.

Die Anwendung aus dem Schienenfahrzeugbau stellt ebenfalls einen Überlappstoß dar. Hier wird eine Mischverbindung aus 1,5 mm hochlegierten, nichtrostenden, höherfesten Stahl, X2CrNi12+2B, mit 8 mm dicken höherfesten Baustahl, S355J2G4C+N verschweißt. Diese Anwendung findet bei der Beplankung von Rahmengestellen an der Unterseite statt.

In den durchgeführten Versuchsreihen wurden mittels Variation von Laserleistung und dem Abstand a zwischen Laser- und Lichtbogenfußpunkt, deren Einfluss auf die Prozessstabilität ermittelt. Das Resultat unterschiedlicher Fokuslagen wurde anhand der Mischverbindung untersucht.

Der HX340LAD Z100 wurde im Kurzlichtbogen mit 135 A und 20,0 V geschweißt. Dabei kann bis zu einer Schweißgeschwindigkeit von 1,8 m/min konventionell eine MAG Auftragsnaht geschweißt werden. Mit 190 W Laserleistung kann diese Geschwindigkeit um 22 % auf 2,2 m/min erhöht werden. Hierfür wurde ein Abstand a von 1 mm eingestellt. Bei der Überlappverbindung liegt die konventionelle Schweißgeschwindigkeit bei 0,8 m/min. Hier kann die Geschwindigkeit um 100 % mit einer Laserleistung von 253 W bei $a = 0,2$ mm auf 1,6 m/min gesteigert werden.

Für die Mischverbindung des X2CrNi12+2B mit S355J2G4C+N wurde im Sprühlichtbogen mit 258 A und 28,2 V geschweißt. Durch eine Defokussierung um +5,4 mm und 315 W Laserleistung kann die Geschwindigkeit der Überlappverbindung von 1,4 m/min, mit $a = 2$ mm um 42% auf 2,0 m/min erhöht werden. Beim Schweißen

im Fokus wird eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 1,8 m/min bei $a = 2 \text{ mm}$ erreicht.

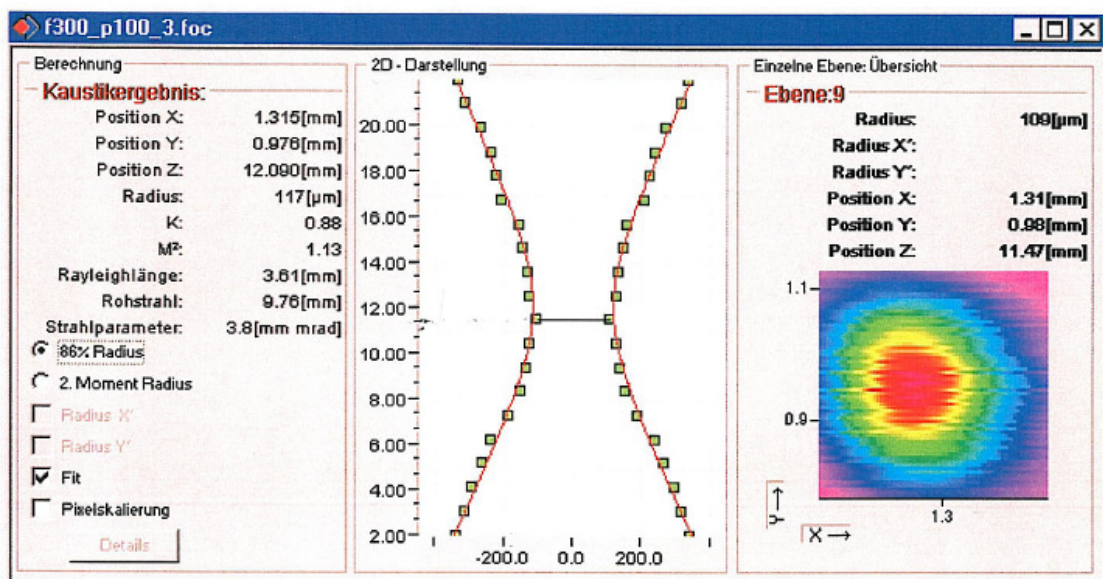
Bei diesen Parametern tritt unter entsprechend hohen Geschwindigkeiten zum Teil ein erhebliches Volumendefizit der Nahtquerschnittsfläche auf. Dadurch entstehen geometrische Kerben. Für die Mischverbindung sind diese stärker ausgeprägt. Bei dem HX340LAD Z100 ist das Volumendefizit allerdings nicht relevant.

Eine gezieltes Ablenken des Lichtbogens konnte nicht beobachtet werden. Bei entsprechend hoher Laserleistung ließ sich das Schmelzbad aber in gewissen Grenzen auslenken.

Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, die Anwendungsgrenzen des engen Prozessfensters zu untersuchen, um die industrielle Anwendbarkeit der Verfahrenskopplung zu gewährleisten. Der optimale Abstand a wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Ob diese werkstoffabhängig, lichtbogenabhängig (Stromstärke) oder von der Stoßform abhängig sind, muss durch weitere Versuche geklärt werden. Weiterhin muss der Einfluss der Defokussierung für den Werkstoff HX340LAD Z100 untersucht werden.

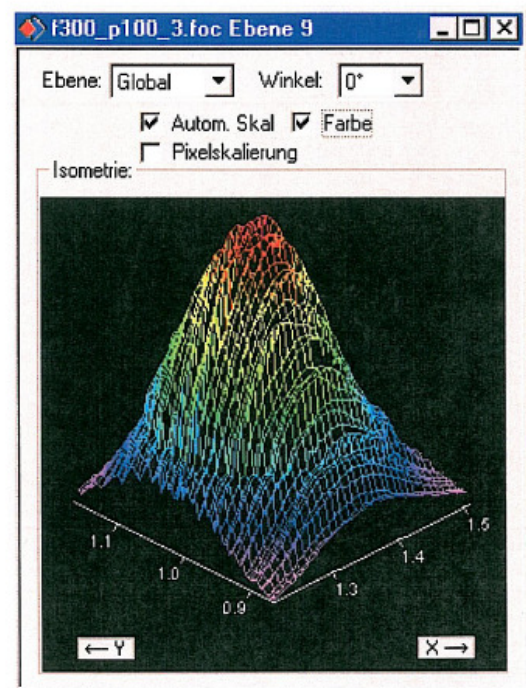
Durch diese Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Kopplung des MSG-Prozesses mit einem CO_2 -Laser niedriger Leistung für die Industrie vorteilhafte Eigenschaften aufweist. Es wurden Prozessmöglichkeiten, -eigenschaften und -grenzen aufgezeigt, wobei die Grenzen in einem engen Prozessfenster und dem auftretenden Volumendefizit des Nahtquerschnittes begründet sind.

Anlage 1: Strahlkaustik DC035



f300_p100_3.foc- ...

Ebene:	Ebene 9
Radius [mm]	0.111
Radius X' [mm]	0.116
Radius Y' [mm]	0.106
Winkel [°]	-42.9
Position X [mm]	1.317
Position Y [mm]	0.977
Position Z [mm]	11.474
Nullwert [A/D-Cnts]	154.250
Leistung [kW]	3.360
Peak inten. [kW/cm²]	14872.385
Datum:	27. 9. 1
Uhrzeit:	15: 9:13
Brennweite [mm]	300.000
Z-Achsen Offset	0.000
X-Achsen Offset	0.000
Y-Achsen Offset	0.000
Koordinatenrotation [dg]	0.000
Wellenlänge [μm]	10.600
Bemerkung:	SWM, SK60



Literaturverzeichnis

- [1] Verfasser: Fronius International GmbH <www.fronius.de>:
Die neue Revolution des digitalen MSG-Schweißens.
URL: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-5FFFB0A1-39FA2E51/fronius_international/22_cmt_neue_revolution_des_digitalen_msg-schweissens.pdf> – verfügbar am: 10.10.2008; 5 Seiten.
- [2] GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH:
SFI aktuell 2008
- [3] Verfasser: Prof. Dr.-Ing. G. Kötting <www.fh-muenster.de>:
2. Lichtbogenschweißen.
URL: <https://www.fh-muenster.de/fb3/downloads/werkstofftechnik/fuege_schweiss/FT_Kap_2.1-2.3_Lichtbogenschweissen.pdf> – verfügbar am: 17.10.2008
- [4] Verfasser: Pangas AG <www.pangas.ch>:
Lichtbogenarten.
URL: <http://www.pangas.ch/international/web/lg/ch/likelgchpangasde.nsf/docbyalias/bran_ats_schw_lic> – verfügbar am: 17.10.2008
- [5] Neuenhahn, J. C.:
Hybridschweißen als Kopplung von CO₂-Hochleistungslasern mit Lichtbogenschweißverfahren.
Aachener Berichte Fügetechnik. – Aachen: Shaker Verlag – 1999
- [6] Weigelt, S.:
Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen im T-Stoß für Luftfahrtspezifische Strukturen mit dem Faserlaser.
Dresden – HTW Dresden – Fachbereich Maschinenbau / Verfahrenstechnik – Diplomarbeit – 2006.
- [7] Verfasser: www.wikipedia.de
Lasing - stimulierte Photonenemission.
URL: <<http://de.wikipedia.org/wiki/Laser>> - verfügbar am 05.01.2009
- [8] Verfasser: CAMBRIDGE LASERS LABORATORIES, INC. LEXEL LASER <www.lexellaser.com>:
Transverse modes.
URL: <http://www.lexellaser.com/techinfo_gas-ion.htm> - verfügbar am: 05.01.2009
- [9] Cui, H.:
Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten kombinierter Laser-Lichtbogentechnik.
1991. – 176 Seiten. Braunschweig, TU Carolina-Wilhemina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation.
- [10] Eichler, J.; Dünkel, L.; Eppich, B.:
Die Strahlqualität von Lasern.
In: Laser Technik Journal. – (2004) 2, Seite 63 – 66

- [11] Eichler, J.; Eichler, H. J.:
Laser.
6. Auflage – Berlin – Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 2006.
- [12] Verfasser: Rofin-Sinar Technologies Inc. <www.rofin.com>:
CO₂-Slab-Laser, DC-Serie.
URL: <<http://www.rofin.com/deutsch/produkte/makro-macro-laser/pict/pr-slab.gif>> – verfügbar am: 20.12.2008
- [13] Keller, H.:
CO₂-Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen von Baustählen im Blechdickenbereich von 12 bis 25 mm.
Aachener Berichte Fügechnik. – Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [14] König, M.:
Bewertung des Potenzials von Hybridschweißprozessen zur Substitution konventioneller Prozesse in der industriellen Fertigung.
- [15] Dilthey, U.; Brandenburg, A.; Olschok, S.:
Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen – Neue Fertigungsmöglichkeiten für den Rohrbau.
In: Schweißen und Schneiden. – (2005) 7, Seite 323 – 329
- [16] Dilthey, U.; Woeste, K.; Wagner, N.:
Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen von Aluminium- und Magnesiumlegierungen.
In: Schweißen und Schneiden. – (2007) 1, Seite 16 – 21
- [17] Guidline No. 19 des DNV (04/2006) „Qualification and Approval of Hybrid Laser-Arc Welding in Shipbuilding“
- [18] Entwurf Norm DIN EN ISO 9956 – 11 (in Vorbereitung).
„Anforderungen und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe“ – Teil 11: „Schweißanweisung für das Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen“
- [19] Meyer, G.; Winkel, G.:
Profile nach Maß.
In: Laser Technik Journal. – (2008) 5, Seite 31 – 35
- [20] Lowke, J. J.; Kovitya, P.; Schmidt, H. P.:
Theory of free-burning arcs, cathode sheaths and cathodes.
In: Journal of Physics D: Applied Physics. – (1992) 25, Seite 1600 – 6
- [21] Peiyuan, Z.; Lowke, J. J.;Morrow, R.:
A unified theory of free-burning arcs, cathode sheaths and cathodes.
In: Journal of Physics D: Applied Physics. – (1992) 25, Seite 1221 – 30
- [22] Olsen, H. N.:
Thermal and electrical properties of an argon plasma.
Phys. Fluids. – (1959) 2, Seite 614 – 23
- [23] Paulini, J.; Simon, G.:
A theoretical lower limit for laser power in laser-enhanced arc welding.
In: Journal of Physics D: Applied Physics. – (1993) 26, Seite 1523 – 1527

- [24] Jasna, U.; Gaede, R.:
Hochleistungsfaserlaser im Schiffbau.
In: Laser Technik Journal. – (2008) 2, Seite 30 - 33

- [25] Jahn, A.; Winderlich, B.; Zwick, A.; Imhoff, R.; Brenner, B.; Trümper, S.:
Laserstrahl-Hybridschweißen schwingend Belasteter Bauteile aus dem
hochfesten Feinkornbaustahl S1100QL.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – (2004) Band 232, Seite 283-288.

- [26] Steen, W. M.; Eboo, M.:
Arc augmented laser welding.
In: metal construction. – (1979) 7, Seite 332 - 335

- [27] Stahlhut, C.; Ziems, F.; Hermsdorf, J.; Kling, R.; Meier, O.; Ostendorf A.;
Haferkamp, H.:
Stabilisierung des Lichtbogenschweißens durch Laserstrahlung geringer
Leistung.
In: Aachener Berichte Fügetechnik. – Aachen: Shaker Verlag – (2007), Seite
531-541.

- [28] Kling, R.; Otte, F.; Stahlhut, C.; Hermsdorf, J.:
Minimale Laserleistung mit Lasern angepasster Strahleigenschaften für das
Laser/MSG-Hybrid-Schweißen in Fertigungssystemen für die
Fahrzeugfertigung.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – (2007) Band 244, Seite 409-418.

- [29] Hermsdorf, J.; Ostendorf A.; Stahlhut, Barroi, A.; Otte, F.; Kling, R.:
Guidance and stabilisation of electric arc welding using Nd:YAG laser radiation.
In: PICALO 2008 Conference Proceedings. – Paper 707. – Seite 335-340.

- [30] Cui, H.; Decker, I.; Pursch, H.; Ruge, J.; Wendelstorf, J.; Wohlfahrt, H.:
Laserinduziertes Fokussieren des WIG-Lichtbogens.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – (1992) Band 146, Seite 139-143.

- [31] Finke, B. R.; Stern, F.; Decker, I.:
Auswirkungen eines unterstützenden Laserstrahls auf den WIG-
Schweißprozess.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – (1991) Band 135, Seite 149-152.

- [32] Wendelsdorf, J.:
Plasma and Laser Enhanced Arc Welding for Automatic Applications.
Final Technical Report. – (1993) – Contract Nr. BREU-0069; Prosal Nr. BE-
3037

- [33] Diebhold, T. P.; Albright, C. E.:
„Laser-GTA“ Welding of Aluminium Alloy 5052.
In: Welding Journal. – (1984) vol. 63, No. 6, Seite 18-24

- [34] Fuerschbach, P.:
Laser Assisted Plasma Arc Welding
Sandia National Laboratories – Albuquerque – New Mexico, USA
- [35] Wendelstorf, J.; Decker, I.; Wohlfahrt, H.:
Laserstrahl-WIG Schweißen von Aluminiumlegierungen.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – (1994), Band 170, Seite 72-75.
- [36] Walduck, R. P.; Biffin, J.:
Plasma arc augmented laser welding of aluminium.
In: Lasers & Power Beam Processing, (1995).
- [37] Behler, K.; Maier, C.; Neuenhahn, J.:
Kombination von Laserstrahl- und Metallschutzgasschweißverfahren zum
Fügen unlegierter Stähle.
In: DVS-Berichte. – Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren
DVS Verlag GmbH. – Band 186, Seite 182-186.
- [38] Hu, B.:
Nd:YAG Laser-assisted arc welding.
Delft – Ph. D. thesis Delft University of Technology – 2002.
- [39] Herausgeber: Informationsdienst Edelstahl Rostfrei:
Merkblatt 821.
Informationsdienst Edelstahl Rostfrei – Düsseldorf (2003)
- [40] Herausgeber: Thyssen Krupp Nirosta GmbH
Nirosta 4003.
Thyssen Krupp Nirosta GmbH – Krefeld (2007)
- [41] Verfasser: Lober, D. < <http://www.metallograf.de/start.htm> >:
Schaeffler Diagramm.
URL: < <http://www.metallograf.de/start.htm> > – verfügbar am: 13.01.2009

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum, Unterschrift